

Grado Universitario en Ingeniería Mecánica  
Curso 2017-2018

*Trabajo Fin de Grado*

# “Optimización de la carrocería de un coche de competición para mejorar su comportamiento aerodinámico”

---

Alejandro Agustín Hurtado

Tutor

Rafael Pérez Álvarez

Leganés, octubre 2018



**TRABAJO FIN DE GRADO**

**“OPTIMIZACIÓN DE LA CARROCERÍA DE UN COCHE DE COMPETICIÓN  
PARA MEJORAR SU COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO”.**

Autor: Alejandro Agustín Hurtado

Tutor: Rafael Pérez Álvarez

Leganés, octubre 2018

**EL TRIBUNAL**

**Presidente:** \_\_\_\_\_

**Vocal:** \_\_\_\_\_

**Secretario:** \_\_\_\_\_



## **Resumen**

En este proyecto se ha diseñado una cascada lateral que se sitúa entre los ejes delantero y trasero y que permite mejorar el comportamiento aerodinámico del monoplaza que el equipo Formula UC3M ha presentado a la competición Formula Student Spain, en la que la Universidad Carlos III de Madrid ha competido en agosto de 2018.

Esta cascada lateral se ha acoplado al resto del monoplaza evitando la existencia de interferencias físicas con otras partes del vehículo, además de que se ha adaptado a la normativa vigente de la competición y se ha acomodado al presupuesto y los recursos de fabricación de los que dispone el departamento de aerodinámica del equipo Formula UC3M.

Delimitados los perfiles alares disponibles por fabricación y presupuesto disponible, se han diseñado y simulado diferentes configuraciones de la cascada lateral para buscar cuál es la que mejores resultados aerodinámicos arroja. El monoplaza precisa de dispositivos aerodinámicos que generen baja resistencia aerodinámica para las pruebas de aceleración, pero también necesita de carga aerodinámica para rendir a un buen nivel en las pruebas como el skidpad o la prueba de resistencia, las cuales se dan en circuitos muy revirados en los que la aerodinámica juega un papel clave tanto en prestaciones puras como en el comportamiento general del monoplaza.

Con el diseño final de la cascada lateral se ha realizado un estudio de la vorticidad y de las líneas de corriente del monoplaza, tanto a baja velocidad como a alta velocidad, que ha permitido comprender el comportamiento dinámico del aire durante el funcionamiento del monoplaza.

Posteriormente se ha detallado la fabricación de los distintos elementos que componen la cascada, indicando los materiales y los procesos empleados.

Por último, se ha elaborado un presupuesto detallado en el que se ha determinado, en primer lugar, el coste de desarrollo del proyecto y, por otro lado, el coste de fabricación de la cascada lateral.





## **Abstract**

This project has as aim the design of a lateral fall that will be placed between the front and rear axle, permitting an improvement in the aerodynamic behaviour of the car that Formula UC3M Team will take to Formula Student Spain competition, in which UC3M will participate in August 2018.

This lateral fall must be able to be attached to the rest of the vehicle avoiding physical interferences with other vehicle parts. Furthermore, it is needed to comply with the current regulations of the competition and accommodate to the budget and manufacturing resources that are available for the Formula UC3M Aerodynamic Department.

Once defined the available wing profiles by manufacturing and budget, different configurations will be designed and simulated for the lateral fall in order to look for which is the one that better aerodynamic results provides. The car needs aerodynamic devices that generate low aerodynamic resistance for the acceleration test, but it also needs of it for doing well in tests like skid pad or resistance test, which appear in twisting tracks where aerodynamics play a key role in pure features as well as in the general behaviour of the car.

With the final design of the lateral fall, it will be done an analysis of the vorticity and the car streamlines, both in low and high speed, allowing to study how the air interacts with this fall.

Later, it will be detailed the manufacturing of the different elements that make up the fall, detailing materials and the employed procedures.

Finally, it will be also done a detailed budget in which it will be determined the approximate cost of the design, simulations and manufacturing of the lateral fall, as well as the time employed in its development.







## **Agradecimientos**

A mis padres, Ángel y María del Carmen, por ser la base sólida de la persona de la que soy. Mis éxitos, más que míos, son vuestros.

A Jota y a los yayos, siento que no estéis aquí para verme, pero ya estoy yo para recordaros.

A toda mi familia, por vuestros mensajes de apoyo y ánimo durante todos estos años de trabajo.

A Carlos Cabañas, porque contigo la carrera fue un poco menos difícil. Y porque si como compañero de universidad fuiste excelente, como amigo eres extraordinario.

A Javier Berlinches, por siempre sacarme un momento para escucharme cuando necesitaba hablar.

A David Izquierdo y a Rafael Pérez, pues sin vosotros no hubiese logrado realizar este proyecto.

A Tere y a la Tata María. En especial. Fuisteis las únicas que siempre confiasteis en mí, sin dudarlo, en ningún momento (y en alguna ocasión os he dado motivos para dudar).



## Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Descripción de la competición .....	1
1.2	Pruebas de la competición Formula Student .....	2
1.2.1	Inspecciones técnicas (0 puntos) .....	2
1.2.2	Pruebas estáticas (325 puntos) .....	4
1.2.3	Pruebas dinámicas (675 puntos) .....	5
1.3	Normativa Formula Student Spain .....	7
1.3.1	Requerimientos generales de diseño .....	7
1.3.2	Requisitos generales del diseño de dispositivos aerodinámicos .....	8
1.4	Estado del arte .....	11
1.5	Motivación del proyecto .....	14
1.6	Objetivos del proyecto .....	15
1.7	Estructura del proyecto .....	16
2	Fundamentos teóricos .....	17
2.1	Caracterización del movimiento de un fluido .....	17
2.2	Resistencia ( <i>drag</i> ) y carga aerodinámica ( <i>lift</i> ) .....	19
2.3	Flujo laminar y flujo turbulento.....	20
2.4	Capa límite .....	21
2.5	Ecuaciones de Navier Stokes en forma integral .....	22
3	Simulaciones y diseño de la cascada lateral .....	23
3.1	Premisas para el diseño .....	23
3.1.1	Perfiles que se pueden emplear .....	23
3.2	Software empleado .....	24
3.2.1	Diseño de los elementos de la cascada lateral.....	24
3.2.2	Creación de mallas en <i>Simscale</i> .....	25
3.2.3	Simulaciones en <i>Simscale</i> .....	28
3.3	Resultados de las simulaciones .....	30
3.3.1	Simulaciones de los perfiles aerodinámicos.....	30
3.3.2	Simulaciones de la cascada lateral con el coche completo .....	40
4	Análisis de la vorticidad del vehículo .....	51
5	Análisis de las líneas de corriente.....	56
5.1	Análisis de las líneas de corriente interactuando con la cascada lateral .....	56



5.2	Efecto del alerón de entrada (slat) en las líneas de corriente .....	58
6	Fabricación .....	60
7	Planificación .....	65
8	Presupuesto.....	66
9	Conclusiones.....	69
10	Trabajos futuros .....	71
11	Bibliografía .....	72
12	Anexos .....	74
12.1	Código en Matlab R2017b para la creación de perfiles .....	74
12.2	Tablas de configuraciones simuladas.....	76
12.2.1	Configuraciones con perfil principal de cuerda 375 mm.....	76
12.2.2	Configuraciones con perfil principal de cuerda 425 mm.....	79
12.3	“Cost-report” de la cascada lateral .....	86
12.4	Planos .....	95

## Índice de figuras

Figura 1.1. Equipos participantes en Formula Student Germany '18 [10].	1
Figura 1.2. Reparto de puntuaciones en las pruebas de Formula Student.	2
Figura 1.3. Salto del piloto en el scrutineering [20].	3
Figura 1.4. Tilt test del C3-R17 del equipo Formula UC3M [18].	3
Figura 1.5. Pegatina de verificación obtenida por el equipo Formula UC3M en Formula Student Spain 2017 [18].	4
Figura 1.6. Formula Student realizando el Skidpad sobre pista mojada artificialmente [13].	6
Figura 1.7. Limitaciones de los elementos aerodinámicos con respecto a las ruedas [9].	8
Figura 1.8. Limitaciones dimensionales de los elementos aerodinámicos [9].	10
Figura 1.9. (a) Radiador del C3-R16. (b) Escape del C3-R16 [17].	11
Figura 1.10. Vista lateral del C3-R17 [18].	12
Figura 1.11. Vista lateral del F-108 del equipo High Speed Karlsruhe [8].	12
Figura 1.12. FSUPV-04 de la Universidad Politécnica de Valencia [11].	13
Figura 1.13. DUT16 del equipo Formula Student Team Delft [5].	13
Figura 1.14. TANKIA 2017 del equipo TUG Racing [21].	14
Figura 1.15. Zonas de instalación de las 2 cascadas laterales.	15
Figura 2.1. Descripciones de Lagrange y de Euler [15].	18
Figura 2.2. Sentido de la resistencia y carga aerodinámica.	19
Figura 2.3. Flujo laminar y turbulento en una tubería circular [19].	20
Figura 2.4. Desprendimiento de la capa límite [14].	21
Figura 3.1. Ubicación cascada lateral en el CAT10E de EITSIB Motorsport [4].	23
Figura 3.2. (a) GOE570 con cuerda 130 mm. (b) FX74_CL5_140 con cuerda 150 mm.	24
Figura 3.3. Configuración de perfiles tras ensamblaje.	25
Figura 3.4. Mallado de perfil FX74_CL5_140 con cuerda 150 mm.	26
Figura 3.5. Diferencias de mallado para los distintos elementos del vehículo.	27
Figura 3.6. Diferentes caras de la Background Box.	28
Figura 3.7. Situación del perfil aerodinámico en el interior de la malla.	31
Figura 3.8. Para el perfil alar: (a) $C_l$ según el número de elementos de la malla. (b) $C_d$ según el número de elementos de la malla.	31
Figura 3.9. Ángulo de ataque, lift, drag y peso para el perfil alar de un avión [6].	32
Figura 3.10. Para perfil GOE570 con cuerda 130 mm: (a) $C_l$ según el ángulo de ataque. (b) $C_d$ según el ángulo de ataque.	33
Figura 3.11. Relación $C_l/C_d$ según el ángulo de ataque para perfil GOE570 con cuerda 130 mm.	34
Figura 3.12. Para perfil FX74_CL5_140 con cuerda 150 mm: (a) $C_l$ según el ángulo de ataque. (b) $C_d$ según el ángulo de ataque.	36
Figura 3.13. Relación $C_l/C_d$ según el ángulo de ataque para perfil FX74_CL5_140 con cuerda 150 mm.	36
Figura 3.14. Para perfil FX74_CL5_140 con cuerda 570 mm: (a) $C_l$ según el ángulo de ataque. (b) $C_d$ según el ángulo de ataque.	38

Figura 3.15. Relación $Cl/Cd$ según el ángulo de ataque para perfil FX74_CL5_140 con cuerda 570 mm. ....	38
Figura 3.16. Coche sobre el que se realiza el análisis de sensibilidad de malla. ....	40
Figura 3.17. Para el coche completo: (a) $Cl$ según el número de elementos de la malla. (b) $Cd$ según el número de elementos de la malla. ....	41
Figura 3.18. Malla definitiva para el coche completo con 9515721 elementos. ....	41
Figura 3.19. Elementos que integran la cascada lateral. ....	42
Figura 3.20. Gap y overlap entre perfiles. ....	43
Figura 4.1. Vorticidad justo antes de la cascada lateral. ....	51
Figura 4.2. Vorticidad en el slat. ....	52
Figura 4.3. Vorticidad en la parte delantera del perfil principal. ....	52
Figura 4.4. Vorticidad en la parte delantera del perfil principal sin coche. ....	53
Figura 4.5. Vorticidad en la parte trasera del perfil principal. ....	53
Figura 4.6. Vorticidad en el perfil secundario. ....	54
Figura 4.7. Vorticidad al final de la cascada lateral. ....	54
Figura 5.1. (a) Coche con 200 líneas de corriente circulando a 60 km/h (vista frontal-superior) (b) Coche con 200 líneas de corriente circulando a 60 km/h (vista trasera-inferior). ....	56
Figura 5.2. (a) Coche con 1000 líneas de corriente circulando a 60 km/h (vista lateral-inferior). (b) Coche con 500 líneas de corriente circulando a 60 km/h (vista inferior). .	57
Figura 5.3. (a) Coche con gurney flap con 500 líneas de corriente circulando a 60 km/h (vista frontal-inferior. (b) Coche con gurney flap con 500 líneas de corriente circulando a 60 km/h (vista trasera). ....	58
Figura 5.4. (a) Cascada lateral sin slat con 1000 líneas de corriente a 60 km/h (vista lateral-inferior). (b) Cascada lateral con slat con 1000 líneas de corriente a 60 km/h (vista lateral-inferior). ....	58
Figura 5.5. (a) Cascada lateral sin slat con 1000 líneas de corriente a 60 km/h (vista frontal inferior). (b) Cascada lateral con slat con 1000 líneas de corriente a 60 km/h (vista frontal-inferior). ....	59
Figura 6.1. Costillas de la cascada lateral. ....	60
Figura 6.2. Endplate exterior de la cascada lateral. ....	60
Figura 6.3. Sierra de hilo caliente cortando el poliestireno extruido del perfil principal. ....	61
Figura 6.4. Diferencias entre zona lijada y no lijada en el poliestireno. ....	62
Figura 6.5. Slat tras el proceso de lijado, enmasillado y pegado de las costillas. ....	62
Figura 6.6. Perfiles de la cascada lateral y alerón delantero recanteados. ....	63
Figura 6.7. Explosionado tridimensional de la cascada lateral. ....	64
Figura 6.8. C3-R18 en la competición Formula Student Spain. ....	64
Figura 7.1. Diagrama de Gantt del proyecto. ....	65
Figura 8.1. Calendario seguido para el diseño y fabricación de la cascada lateral. ....	66
Figura 9.1. Prueba de deformación del perfil principal del alerón delantero. ....	69

## Índice de tablas

Tabla 3.1. Fuerzas y coeficientes para el perfil GOE570 con cuerda 130 mm según el ángulo de ataque. ....	33
Tabla 3.2. Fuerzas y coeficientes para el perfil FX74_CL5_140 con cuerda 150 mm según el ángulo de ataque.....	35
Tabla 3.3. Fuerzas y coeficientes para el perfil FX74_CL5_140 con cuerda 570 mm según el ángulo de ataque.....	37
Tabla 3.4. Configuración de la Cascada 10.....	43
Tabla 3.5. Configuración de la Cascada 15.....	44
Tabla 3.6. Configuración de la Cascada 17.....	44
Tabla 3.7. Resultados de las configuraciones con perfil principal de cuerda 375 mm. ..	44
Tabla 3.8. Configuración de la Cascada 37.....	45
Tabla 3.9. Configuración de la Cascada 40.....	45
Tabla 3.10. Configuración de la Cascada 46.....	46
Tabla 3.11. Configuración de la Cascada 47.....	46
Tabla 3.12. Resultados de las configuraciones con perfil principal de cuerda 425 mm. 46	46
Tabla 3.13. Resultados de las configuraciones con perfil principal de cuerda 425 mm. 47	47
Tabla 3.14. Configuración de la Cascada 48.....	48
Tabla 3.15. Configuración de la Cascada 49.....	48
Tabla 3.16. Configuración de la Cascada 50.....	48
Tabla 3.17. Configuración de la Cascada 51.....	48
Tabla 3.18. Configuración de la Cascada 52.....	49
Tabla 3.19. Configuración de la Cascada 53.....	49
Tabla 3.20. Resultados de las configuraciones con perfil principal de cuerda 570 mm. 49	49
Tabla 3.21. Fuerzas generadas por los distintos elementos aerodinámicos de la cascada lateral.....	50
Tabla 8.1. Coste de los trabajadores. ....	67
Tabla 8.2. Coste de fabricación en material, procesos y tornillería de la cascada lateral. ....	67
Tabla 8.3. Coste total de la cascada lateral.....	68
Tabla 12.1. Configuración de la Cascada 1.....	76
Tabla 12.2. Configuración de la Cascada 2.....	76
Tabla 12.3. Configuración de la cascada 3.....	76
Tabla 12.4. Configuración de la Cascada 4.....	76
Tabla 12.5. Configuración de la Cascada 5.....	77
Tabla 12.6. Configuración de la Cascada 6.....	77
Tabla 12.7. Configuración de la Cascada 7.....	77
Tabla 12.8. Configuración de la Cascada 8.....	77
Tabla 12.9. Configuración de la Cascada 9.....	78
Tabla 12.10. Configuración de la Cascada 11.....	78
Tabla 12.11. Configuración de la Cascada 12.....	78
Tabla 12.12. Configuración de la Cascada 13.....	78
Tabla 12.13. Configuración de la Cascada 14.....	79
Tabla 12.14. Configuración de la Cascada 16.....	79



Tabla 12.15. Configuración de la Cascada 18.....	79
Tabla 12.16. Configuración de la Cascada 19.....	79
Tabla 12.17. Configuración de la Cascada 20.....	80
Tabla 12.18. Configuración de la Cascada 21.....	80
Tabla 12.19. Configuración de la Cascada 22.....	80
Tabla 12.20. Configuración de la Cascada 23.....	80
Tabla 12.21. Configuración de la Cascada 24.....	81
Tabla 12.22. Configuración de la Cascada 25.....	81
Tabla 12.23. Configuración de la Cascada 26.....	81
Tabla 12.24. Configuración de la Cascada 27.....	81
Tabla 12.25. Configuración de la Cascada 28.....	82
Tabla 12.26. Configuración de la Cascada 29.....	82
Tabla 12.27. Configuración de la Cascada 30.....	82
Tabla 12.28. Configuración de la Cascada 31.....	82
Tabla 12.29. Configuración de la Cascada 32.....	83
Tabla 12.30. Configuración de la Cascada 33.....	83
Tabla 12.31. Configuración de la Cascada 34.....	83
Tabla 12.32. Configuración de la Cascada 35.....	83
Tabla 12.33. Configuración de la Cascada 36.....	84
Tabla 12.34. Configuración de la Cascada 38.....	84
Tabla 12.35. Configuración de la Cascada 39.....	84
Tabla 12.36. Configuración de la Cascada 41.....	84
Tabla 12.37. Configuración de la Cascada 42.....	85
Tabla 12.38. Configuración de la Cascada 43.....	85
Tabla 12.39. Configuración de la Cascada 44.....	85
Tabla 12.40. Configuración de la Cascada 45.....	85







# 1 Introducción

## 1.1 Descripción de la competición

La Formula Student es una competición que surge en Estados Unidos en la década de los 80 organizada por la SAE (Society of Automotive Engineers) en la que estudiantes universitarios de ingeniería diseñan, fabrican y compiten con un monoplaza tipo fórmula contra otras universidades del mundo, el cual está sujeto a una normativa impuesta por los organizadores de la prueba.

Esta competición no se limita únicamente al diseño y fabricación del monoplaza, sino que también se extiende hacia ámbitos de marketing y organización industrial, como son la creación de un plan de negocio o el cálculo de costes de la fabricación del vehículo.

La Formula Student se basa en el hecho de que una empresa imaginaria contrata a un equipo de ingenieros para diseñar un monoplaza tipo fórmula para una competición monomarca. Todos los prototipos que participan en el certamen son evaluados por la empresa (la cual está integrada por jueces expertos en el mundo de la competición), que determina cuál de todos los equipos ha creado el mejor monoplaza y es la mejor opción para poder producirlo en serie.

Este certamen se desarrolla en más de 50 países de América, Europa, Asia y Oceanía, en circuitos emblemáticos tales como Montmeló (España), Hockenheim (Alemania), Silverstone (Reino Unido) o el Michigan International Speedway (Estados Unidos).



Figura 1.1. Equipos participantes en Formula Student Germany '18 [10].

## 1.2 Pruebas de la competición Formula Student

La competición está dividida en dos tipos de pruebas: estáticas, en las cuales se pueden conseguir un máximo de 325 puntos, y dinámicas, en las que se pueden obtener un máximo de 675 puntos. Indicar que, para que un monoplaza pueda participar en las pruebas dinámicas, ha de superar con éxito las debidas inspecciones técnicas [13].

En la Figura 1.2 se puede observar el reparto de las puntuaciones para cada una de las pruebas. Nótese que los sectores amarillentos corresponden a las pruebas estáticas mientras que, los azulados, corresponden a las dinámicas.

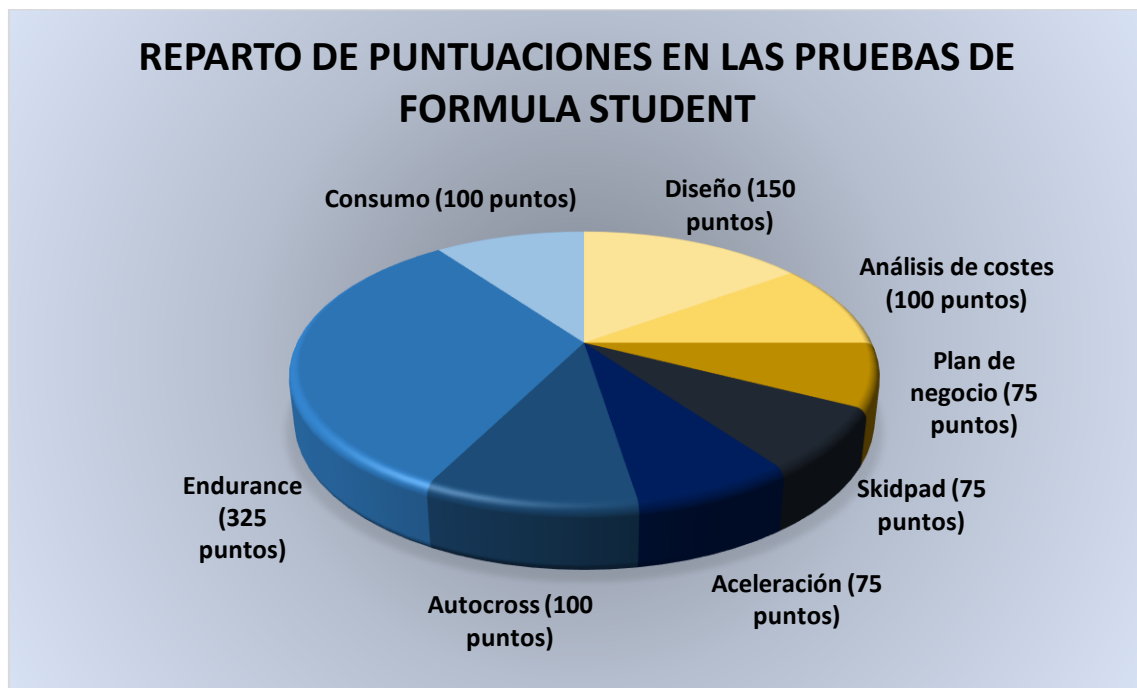


Figura 1.2. Reparto de puntuaciones en las pruebas de Formula Student.

### 1.2.1 Inspecciones técnicas (0 puntos)

Las inspecciones técnicas tienen como objetivos establecer si el monoplaza presentado cumple la normativa vigente de la competición y si este es seguro para su uso en pista. Estas inspecciones técnicas son [2]:

- **Preinspección:** se verifica que la ropa de seguridad y los cascos de los pilotos cumplan la normativa. Además, se deben presentar dos juegos de neumáticos montados en las llantas, uno para condiciones de seco y otro para condiciones de mojado.
- **Scrutineering o verificación técnica:** los jueces de la competición examinan el monoplaza, determinando si el monoplaza cumple los requisitos técnicos establecidos en la normativa de la competición. Aquí se revisan las distancias, materiales empleados, arcos de seguridad del chasis, posición del piloto, peso del monoplaza con el depósito lleno... Además, se evalúa si el piloto es capaz de salir del vehículo en un tiempo inferior a cinco segundos (ver Figura 1.3).



Figura 1.3. Salto del piloto en el scrutineering [20].

- **Tilt test o prueba de vuelco:** se introduce al monoplaza con el piloto en el interior sobre una plataforma horizontal. Posteriormente esta plataforma se inclina a  $45^{\circ}$  verificando que el monoplaza no pierde líquidos. Por último, se inclina el monoplaza hasta  $60^{\circ}$  sobre el plano horizontal (ver Figura 1.4), comprobando que este no vuelque.



Figura 1.4. Tilt test del C3-R17 del equipo Formula UC3M [18].

- **Noise test (sólo para vehículos con motor de combustión interna):** el piloto debe revolucionar el motor hasta un cierto régimen de vueltas del motor (régimen que depende del motor empleado), no debiendo superar los 110 dBa a una distancia de medio metro del tubo de escape.



- **Brake test o prueba de frenado:** el piloto debe acelerar durante un tramo acotado y debe ser capaz de frenar bloqueando las cuatro ruedas al mismo tiempo, sin que el monoplaza desvíe su trayectoria, demostrando la capacidad de frenada del vehículo.
- **Rain test o prueba de lluvia (sólo para monoplazas eléctricos):** se rocía al monoplaza con agua y se verifica el buen aislamiento de los componentes eléctricos y electrónicos.

Cuando el monoplaza ha superado estas pruebas, un juez colocará una pegatina en el mismo, indicando que el vehículo es apto para participar en las pruebas dinámicas. Además, en esta pegatina, figura el peso en kilogramos del vehículo (ver Figura 1.5).



Figura 1.5. Pegatina de verificación obtenida por el equipo Formula UC3M en Formula Student Spain 2017 [18].

### 1.2.2 Pruebas estáticas (325 puntos)

- **Business plan presentation event o presentación del plan de negocio (75 puntos):** uno o más miembros del equipo exponen el plan de negocio en el que se muestra a unos inversores potenciales (en este caso los jueces de la competición) el por qué deberían apostar por el proyecto expuesto. Para ello, los miembros el equipo presentarán aspectos tales como la amortización del proyecto, las prestaciones del vehículo o las rentabilidades de la producción del vehículo en serie.
- **Cost and manufacturing event o evento de costes y fabricación (100 puntos):** unas semanas antes de que se dé el certamen, el equipo entrega a la organización

de la competición un documento en el cual se indican los costes de fabricación de todas las piezas del monoplaza. En este documento se especifican los materiales empleados, los procesos de fabricación que se han utilizado, moldes usados, tornillería, elementos comerciales comprados, etc., siempre buscando la mayor concordancia entre lo redactado en el documento y el prototipo fabricado. Todos estos datos se introducen en unas tablas que la competición pone a disposición de las distintas universidades y, a partir de ellas, se exponen los costes de fabricación para 1000 monoplazas.

Los jueces evalúan tanto la capacidad del equipo a la hora de realizar estimaciones de costes precisas como la buena capacidad del equipo de gestionar sus propios recursos.

- **Design event o evento de diseño (150 puntos):** es la prueba estática que tiene una mayor puntuación. Semanas antes de la competición, el equipo entrega un documento en el que se reflejan las características principales del monoplaza, así como los criterios que se han seguido a la hora de la toma de decisiones en el diseño del vehículo.

Posteriormente se defiende ante los jueces las decisiones de diseño que los estudiantes han tomado. En esta defensa los jueces preguntarán a los alumnos sobre determinados componentes del monoplaza y cotejarán estas respuestas con el documento entregado previamente y el vehículo físico.

### 1.2.3 Pruebas dinámicas (675 puntos)

- **Skidpad (75 puntos):** para esta prueba el monoplaza debe recorrer un circuito en forma de 8 delimitado por conos en el menor tiempo posible con el fin de poner a prueba la estabilidad y el paso por curva del vehículo. En este circuito, que puede estar mojado o seco según la competición en la que se participe, se deberán dar dos vueltas al primer círculo del 8 en un sentido y, posteriormente, dar otras dos vueltas al segundo círculo en sentido contrario al anterior, saliendo finalmente por la zona habilitada para ello. Para esta prueba se realizarán 4 intentos, 2 por piloto. En la Figura 1.6 se puede ver a un monoplaza realizando esta prueba.

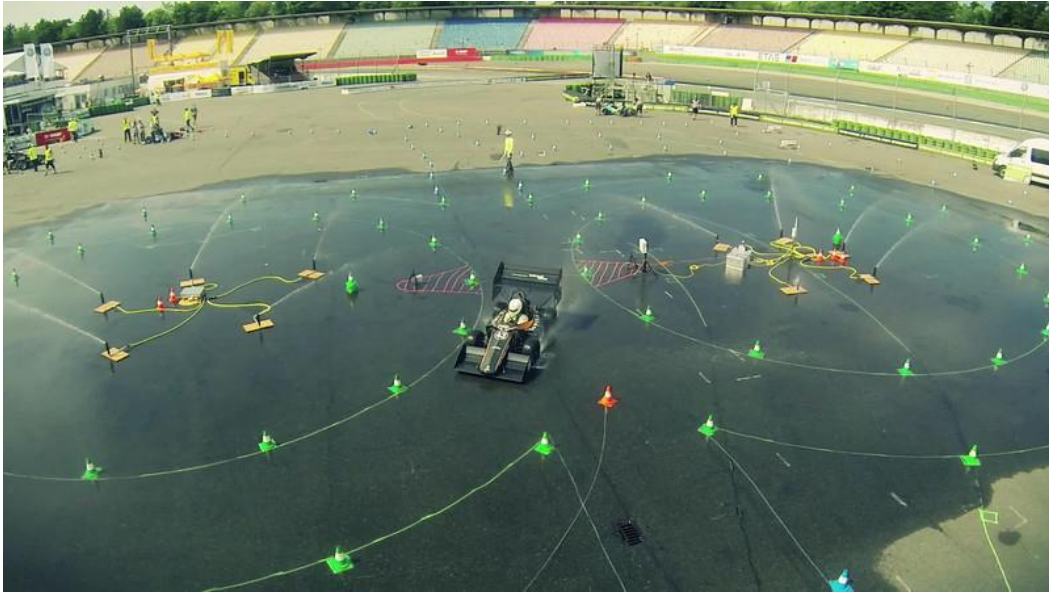


Figura 1.6. Formula Student realizando el Skidpad sobre pista mojada artificialmente [13].

- **Acceleration event o prueba de aceleración (75 puntos):** en esta prueba se evalúa la capacidad de aceleración del vehículo en las condiciones naturales de la pista, cronometrando el tiempo que tarda el monoplaza en recorrer 75 metros acelerando desde parado. Para que la prueba se dé como válida, el monoplaza debe de estar a una distancia mínima de 30 centímetros por detrás de la línea de salida. En esta prueba se realizarán 4 intentos, 2 por piloto.
- **Autocross event (100 puntos):** el monoplaza deberá recorrer en esta prueba un circuito de aproximadamente 800 metros con curvas muy reviradas, dando dos vueltas consecutivas cronometradas en las que se pondrán a prueba el paso por curva del vehículo y la capacidad de aceleración y frenada del mismo. Al igual que en las dos pruebas anteriores, existen 4 intentos, 2 por piloto.
- **Endurance event o prueba de resistencia (325 puntos):** esta prueba se da en un circuito muy similar al del autocross, exprimiendo tanto la velocidad del vehículo como la resistencia mecánica del mismo en un recorrido de 22 kilómetros en total.

Para los monoplazas con motor de combustión interna, se llena el depósito de combustible por completo antes de iniciar el recorrido. En esta prueba sólo se puede realizar un intento y es obligatorio un cambio de pilotos a los 11 kilómetros de iniciar la prueba. En este intercambio de pilotos, que tendrá una duración de 3 minutos, se podrán hacer ajustes para acomodar la posición del segundo piloto. Si este cambio de pilotos dura más de 3 minutos, el tiempo extra se sumará al resto de la prueba, con el fin de poder evaluar la facilidad del vehículo de adaptarse a otro piloto.



Como peculiaridad, en esta prueba corren varios monoplazas de distintos equipos a la vez y estos se podrán adelantar entre sí cuando los comisarios que portan banderas azules así lo indiquen y en las zonas delimitadas para tal fin (un carril lento para el vehículo que va a ser rebasado y la pista para el vehículo que va a adelantar).

Al final de esta prueba, se apaga el motor y se vuelve a llenar el depósito por completo, midiendo la cantidad de combustible que entra en el depósito.

- **Fuel economy o economía de combustible (100 puntos):** en esta prueba se evalúa el consumo de combustible durante la prueba de resistencia. Para que esta prueba se dé como válida y sea puntuable se deben gastar un máximo de 5.72 litros de combustible, no ser más de un tercio más lentos que el equipo más rápido y que se haya completado con éxito el cambio de pilotos.

### 1.3 Normativa Formula Student Spain

En Formula Student existe una normativa que los monoplazas de los diferentes equipos deben de cumplir para poder participar y competir en igualdad de condiciones contra sus adversarios. En lo referente a la aerodinámica, las restricciones de la normativa se focalizan en el tamaño de los elementos aerodinámicos, su posicionamiento y su resistencia estructural.

A continuación, se detallarán las diferentes normas relacionadas con la aerodinámica, extraídas de la normativa de Formula Student Germany [9] en sus capítulos T1 y T7, que es la misma normativa de Formula Student Spain, competición en la que el equipo Formula UC3M participa en agosto de 2018.

#### 1.3.1 Requerimientos generales de diseño

- **T 1.1.2:** el coche debe tener las ruedas abiertas, un solo asiento y un cockpit abierto con cuatro ruedas que no estén en línea recta.
- **T 1.1.3:** un coche de ruedas abiertas debe satisfacer:
  1. Las ruedas no pueden estar obstruidas cuando son observadas de lado.
  2. Ninguna parte del vehículo puede estar situada 75 mm por delante o por detrás del diámetro exterior de las ruedas delanteras o traseras cuando se ve de lado, cuando las ruedas apuntan hacia delante.

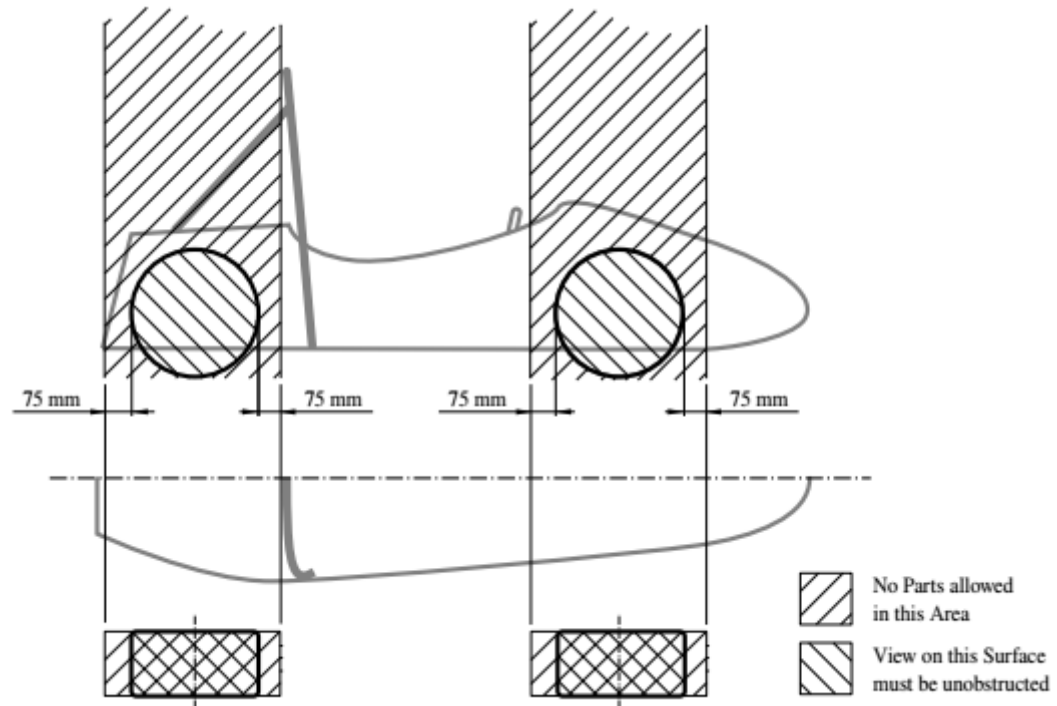


Figura 1.7. Limitaciones de los elementos aerodinámicos con respecto a las ruedas [9].

- **T 1.2.1:** no deben de existir aberturas a través de la carrocería en el compartimento del conductor que no sean para la apertura del cockpit. Sólo están permitidos mínimas aberturas para los sistemas de la suspensión delantera y de la dirección.
- **T 1.2.2:** los chasis cerrados y las estructuras entre el chasis y el suelo deben poseer dos orificios de ventilación de 25 mm de diámetro para evitar la retención de líquidos inflamables.
- **T 1.2.3:** todas las superficies que puedan estar en contacto con un peatón deben tener un radio mínimo de 1 mm. La carrocería por delante de las ruedas delanteras debe tener un radio mínimo de 38 mm y formar al menos  $45^{\circ}$  con la dirección “hacia delante”, a lo largo de la parte superior, lado y el fondo de los bordes afectados.
- **T 1.3.2:** la distancia mínima al suelo (que no sean los neumáticos), incluido el conductor, debe ser de 30 mm.

### 1.3.2 Requisitos generales del diseño de dispositivos aerodinámicos

- **T 7.1.1:** se considera dispositivo aerodinámico a todo aquel diseñado exclusivamente para redirigir el flujo de aire en el monoplaza, incrementando la carga vertical ascendente o reduciendo la resistencia aerodinámica.

- **T 7.2.1:** no se puede empelar ningún elemento para remover el aire por debajo del vehículo, los ventiladores sólo pueden ser diseñados para la refrigeración del vehículo.
- **T 7.3.1: restricciones de altura:**
  1. Los dispositivos aerodinámicos que se encuentren por delante de un plano vertical tras la posición del reposacabezas del piloto deben de estar a menos de 500 mm sobre el suelo.
  2. Los dispositivos aerodinámicos que se encuentren por delante del eje delantero deben de estar a menos de 250 mm del suelo.
  3. Los dispositivos aerodinámicos que se encuentren por detrás de un plano vertical tras la posición del reposacabezas del piloto deben estar a menos de 1200 mm sobre el suelo.
- **T 7.3.2: restricciones de anchura:**
  1. Todos los dispositivos aerodinámicos de menos de 500 mm de altura sobre el suelo que se encuentren por detrás del eje delantero no pueden sobresalir de un plano vertical que toque la cara externa de los neumáticos delantero-trasero.
  2. Los dispositivos aerodinámicos que se encuentren a más de 500 mm del suelo no deben sobresalir de un plano vertical que pase por la cara interna del neumático trasero.
- **T 7.3.3: restricciones de longitud:**
  1. Los dispositivos aerodinámicos no deben extenderse más de 250 mm por detrás de las ruedas traseras.
  2. Los dispositivos aerodinámicos no deben extenderse más de 700 mm por delante de las ruedas traseras.
- **T 7.3.4:** las restricciones deben cumplirse con las ruedas mirando hacia delante y con una configuración de la suspensión cualquiera con o sin conductor.

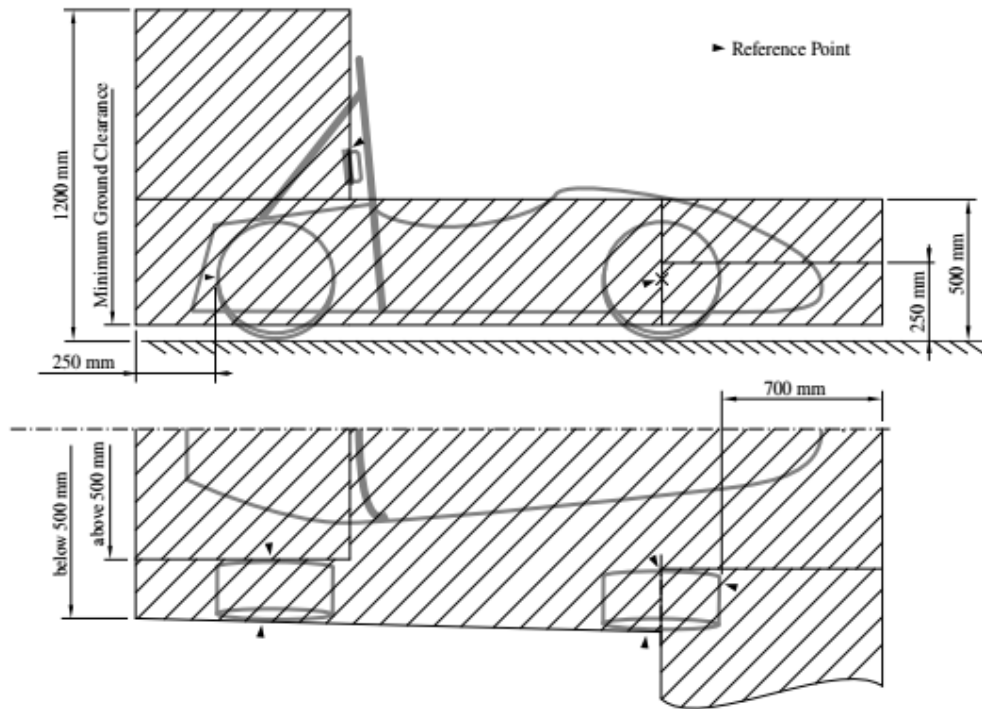


Figura 1.8. Limitaciones dimensionales de los elementos aerodinámicos [9].

- **T 7.4.1:** todos los bordes aerodinámicos orientados hacia delante y que puedan entrar en contacto con un peatón deben tener un radio de 5 mm para los bordes horizontales y 3 mm para los bordes verticales.
- **T 7.5.1:** cualquier dispositivo aerodinámico debe soportar una carga de 200 N sobre un área mínima de  $225 \text{ cm}^2$  y no desviarse más de 10 mm en la dirección de aplicación de la carga.
- **T 7.5.2:** cualquier dispositivo aerodinámico debe soportar una carga puntual de 50 N en cualquier dirección y en cualquier punto y no flexar más de 25 mm.

## 1.4 Estado del arte

En Formula Student la mayoría de los equipos apuestan por instalar diferentes configuraciones aerodinámicas entre los ejes delantero y trasero, tanto para generar carga aerodinámica como para reducir la cantidad de corriente que incide sobre las ruedas traseras.

En los dos primeros coches que presentó Formula UC3M a competición, optó por no incluir elementos aerodinámicos en esta zona a beneficio de instalar los diferentes elementos de refrigeración del vehículo en esta zona. En el primer monoplaza que se presentó, el C3-R16, se instaló a la izquierda del vehículo el radiador y a la derecha el tubo de escape, ambos recuadrados en rojo en la Figura 1.9, resultando una configuración asimétrica entre los ejes. También se incluyó un pequeño fondo plano en esta región entre los ejes, mejorando ligeramente la carga aerodinámica de esta zona.

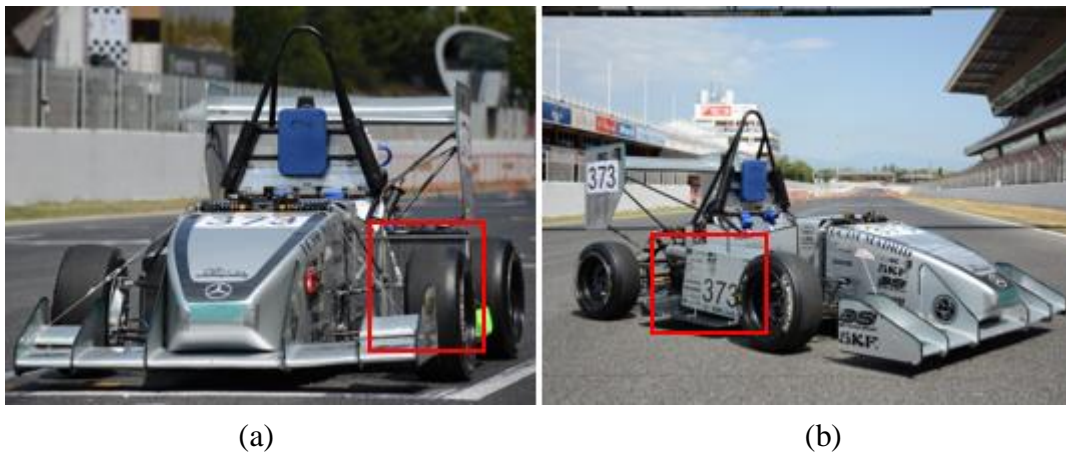


Figura 1.9. (a) Radiador del C3-R16. (b) Escape del C3-R16 [17].

Al año siguiente, con el C3-R17, se optó por la instalación de unos pontones laterales en los que se incluían los radiadores del monoplaza. Por debajo de estos pontones se sitúa el suelo del vehículo, aumentando su curvatura en comparación con el año anterior, buscando generar mayor carga aerodinámica. Con esta combinación simétrica, se buscaba canalizar de una forma más eficiente el flujo de aire hacia la trasera del monoplaza.



Figura 1.10. Vista lateral del C3-R17 [18].

Por otra parte, si se analizan las combinaciones aerodinámicas del resto de equipos que participan en la competición, se pueden observar 2 vertientes bien definidas.

La primera de ellas es optar por la instalación de pontones con formas muy suaves para alterar el flujo de aire lo menos posible, tal y como usa el equipo. Esta es una opción que cada vez está más en desuso, pues los equipos optan por instalar los sistemas de refrigeración en la trasera del vehículo, o bien, instalar pequeños pontones junto con cascadas laterales para así disminuir la resistencia aerodinámica. En la Figura 1.11 se puede observar el monoplaza del equipo High Speed Karlsruhe, el cual lleva instalados pontones a ambos lados del coche y se puede observar la salida de escape a la derecha de este, detalle que recuerda a lo visto en el C3-R16.



Figura 1.11. Vista lateral del F-108 del equipo High Speed Karlsruhe [8].

La segunda opción de diseño es la más utilizada en la actualidad en Formula Student, la cual consiste en la instalación de una cascada lateral instalada entre ambos ejes, lo cual permite una ganancia extra de carga aerodinámica y limitar la corriente incidente sobre las ruedas traseras. Estas cascadas constan de varios perfiles alares en los que existe un perfil principal de mayor tamaño que es el encargado de generar la mayor parte de la carga aerodinámica del conjunto. Por otro lado, los siguientes perfiles son de menor tamaño y se anteponen a las ruedas traseras, estando siempre el borde de salida del último perfil a mayor altura que la rueda trasera. En la Figura 1.12 se puede observar el FSUPV-



04, el cual tiene una cascada lateral que consta de un perfil principal, un perfil secundario y un perfil terciario de menor longitud. Nótese cómo este equipo ha empaquetado todo el sistema de refrigeración en la trasera del vehículo.



Figura 1.12. FSUPV-04 de la Universidad Politécnica de Valencia [11].

Los equipos punteros de la competición han mezclado ambos conceptos para conseguir tener una trasera del vehículo más limpia y dejar más espacio tanto al alerón trasero como al difusor del equipo. En la Figura 1.13 se puede observar el DUT16 de la Universidad de Delft, el cual destaca por mezclar ambos conceptos minimizando el tamaño de los pontones y la cascada lateral a su mínima expresión, en un excelente tamaño de compactación. Nótese que el pequeño diámetro de las ruedas permite disminuir la altura máxima de la cascada lateral.



Figura 1.13. DUT16 del equipo Formula Student Team Delft [5].

Otra interesante mezcla de conceptos es la presentada por el equipo de la Universidad de Graz, equipo ganador de la edición 2017 de Formula Student Spain, en el que se elabora una cascada de dos perfiles alares de pequeño tamaño y, justo debajo, se acoplan los radiadores del vehículo (ver Figura 1.14), evitando tener que instalarlos en la parte trasera del monoplaza en pro de tener una trasera más limpia que permita la instalación de un difusor de mayor tamaño.



*Figura 1.14. TANKIA 2017 del equipo TUG Racing [21].*

## **1.5 Motivación del proyecto**

El equipo Formula UC3M participa en la edición 2018 de la competición Formula Student Spain, la cual se celebra en agosto de dicho año y es la tercera participación del equipo en este certamen.

Tras los resultados cosechados por el equipo en la pasada temporada se decidió rediseñar por completo el kit aerodinámico del monoplaza, buscando maximizar la eficiencia aerodinámica del vehículo. Este kit aerodinámico constará de un alerón delantero, un alerón trasero y una cascada lateral, siendo esta última la principal novedad que el Departamento de Aerodinámica presentará a la competición, puesto que será la primera ocasión en la que el equipo presente estos dispositivos aerodinámicos.

El presente proyecto tiene como objetivo el desarrollo y fabricación de una cascada lateral que se ha de situar a los lados del monoplaza, entre los ejes delantero y trasero (ver zonas recuadradas en rojo en la Figura 1.15), conforme la normativa de la competición. Esta cascada lateral tiene un papel clave en el conjunto aerodinámico: permite reducir la cantidad de corriente que incide sobre las ruedas traseras, con lo que se consigue una menor resistencia aerodinámica generada por las ruedas y se logra reducir la turbulencia generada por las mismas. Además, permite generar carga aerodinámica, lo cual se traduce directamente en un mejor comportamiento dinámico del conjunto.



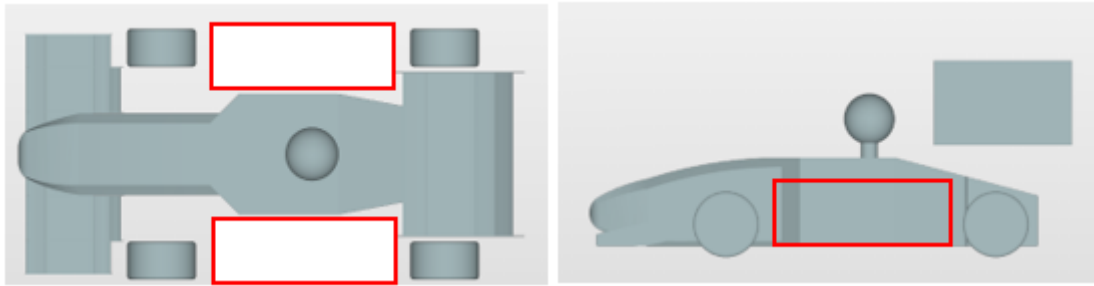


Figura 1.15. Zonas de instalación de las 2 cascadas laterales.

## 1.6 Objetivos del proyecto

El desarrollo del presente proyecto debe de responder a una serie de demandas fijadas por el Departamento de Aerodinámica del equipo para el nuevo monoplaza:

- **Aumentar la carga aerodinámica sin reducir la eficiencia aerodinámica:** se considera que el monoplaza de la pasada temporada 2017 genera una carga aerodinámica insuficiente para un óptimo rendimiento en pruebas como el skidpad o la prueba de resistencia, las cuales se dan en circuitos muy revirados en las que una alta carga aerodinámica permite tomar las curvas a una mayor velocidad y reducir los tiempos por vuelta. Sin embargo, la eficiencia aerodinámica no puede verse mermada, pues una alta resistencia aerodinámica empeora los resultados obtenidos en la prueba de aceleración.
- **Disminuir la resistencia aerodinámica y turbulencia generada por las ruedas traseras:** la instalación de la cascada lateral debe reducir la cantidad de corriente que incide sobre las ruedas traseras y, en consecuencia, estas generarán una menor resistencia aerodinámica y una menor turbulencia.
- **Desarrollo de una cascada lateral fácilmente montable y desmontable:** el kit aerodinámico debe de facilitar las labores de mantenimiento y reparación de los distintos elementos del monoplaza, por lo que debe de poder instalarse y retirarse en un breve espacio de tiempo.
- **Mejorar los resultados obtenidos en la prueba de diseño:** se precisa mejorar la puntuación obtenida en el evento de diseño de la temporada 2017, por lo que el desarrollo de una cascada lateral funcional y correctamente defendida ante los jueces permitirá aumentar la puntuación obtenida en la competición.
- **Costes de fabricación reducidos:** para no empeorar los resultados en la prueba de costes y ser viable para el equipo, la cascada lateral no puede superar un coste de fabricación en materiales y procesos de 1000 €.

## 1.7 Estructura del proyecto

En primer lugar, se detallarán una serie de conceptos teóricos en los que se basan los programas de dinámica computacional de fluidos necesarios para simular las diferentes configuraciones aerodinámicas de la cascada lateral (en este proyecto, el software empleado será *Simscale*). Definidos estos conceptos, se indica cómo se han diseñado mediante dibujo asistido por ordenador con el software *Solidworks 2016* los diferentes elementos que componen la cascada lateral y cómo se han introducido, mallado y simulado las diferentes configuraciones aerodinámicas en *Simscale*.

Posteriormente, se analizarán los resultados obtenidos de todas y cada una de las configuraciones aerodinámicas simuladas con el fin de determinar cuál es la que mejor rendimiento aerodinámico arroja.

Seguidamente a este análisis, se estudiará mediante el software de post-procesado *Paraview 4.3.1*, la vorticidad generada por esta cascada lateral y como las líneas de corriente se adaptan a la forma de los distintos elementos que integran la cascada.

Finalizados los estudios y análisis anteriores, se detallará en profundidad el proceso de fabricación de los distintos elementos aerodinámicos que integran la cascada lateral, así como la planificación seguida para llevar a cabo este proyecto y el coste de diseño y fabricación de esta.

Por último, se especificarán los trabajos futuros que se deberán seguir para mejorar en las siguientes temporadas el rendimiento aerodinámico y se extraerán una serie de conclusiones fruto de la realización de este proyecto.

## 2 Fundamentos teóricos

En el presente apartado se enunciarán las ecuaciones de la mecánica de fluidos que deberá resolver el software *Simscale*, programa de dinámica computacional de fluidos que será empleado para el diseño de la cascada lateral.

En primer lugar, se indicarán cuáles son las diferentes formas que permiten describir el movimiento de las partículas fluidas, esto es, según la descripción lagrangiana y según la descripción euleriana.

Posteriormente se detallarán cuáles son las ecuaciones que permiten calcular la resistencia aerodinámica y sustentación vertical que generan los diferentes elementos de estudio. Se indicará además el sentido que sigue cada fuerza y las variables de las que dependen las mismas.

Seguidamente se explicarán los diferentes estados que adquiere el flujo cuando entre las partículas fluidas existe un gradiente de velocidad, así como la manera de determinar cómo se puede determinar en qué estado se encuentra el flujo según las condiciones en las que se encuentre. Además, se definirá el concepto de capa límite y se detallará la importancia de conocer si existe desprendimiento de capa límite y la influencia de este suceso en los diferentes elementos que componen la cascada lateral.

Por último, se enunciarán las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales son una serie de derivadas parciales no lineales que permiten describir el movimiento de un fluido.

### 2.1 Caracterización del movimiento de un fluido

En el medio fluido, las partículas se mueven independientemente unas de otras con su propia velocidad tridimensional, por lo que, para caracterizar el movimiento del fluido, es necesario recurrir al siguiente campo vectorial [7]:

$$\vec{q} = \frac{\partial x}{\partial t} \vec{i} + \frac{\partial y}{\partial t} \vec{j} + \frac{\partial z}{\partial t} \vec{k} \quad (2.1)$$

Donde:

- $\vec{q}$ : vector velocidad para una partícula fluida en un determinado instante  $t$ .
- $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ : vectores directores del campo vectorial ortogonal.
- $\frac{\partial x}{\partial t}, \frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial z}{\partial t}$ : velocidades instantáneas de la partícula fluida.
- $t$ : instante temporal.

Existen dos formas de describir el movimiento de un fluido [15]:

- **Descripción de Lagrange:** se identifica una partícula fluida y se estudia su movimiento durante todo el tiempo. La trayectoria de la partícula fluida depende de su posición inicial como del instante temporal  $t$  considerado.

$$x = (x_0, y_0, z_0, t) \quad (2.2)$$

$$y = (x_0, y_0, z_0, t) \quad (2.3)$$

$$z = (x_0, y_0, z_0, t) \quad (2.4)$$

Para tener una descripción más detallada y completa del movimiento del fluido en algún campo, será necesario el estudio del movimiento de muchas partículas fluidas (ver Figura 2.1).

- **Descripción de Euler:** en el campo de flujo se estudian unas “ventanas” que recogen la velocidad de cada partícula fluida que pasan por ellas en cualquier instante (ver Figura 2.1). Por ende, la velocidad de la partícula depende tanto de la posición de la ventana como del instante temporal  $t$  considerado.

$$\frac{\partial x}{\partial t} = f(x, y, z, t) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = f(x, y, z, t) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = f(x, y, z, t) \quad (2.7)$$

El nivel de precisión de la descripción de Euler depende tanto del número de ventanas a estudiar, como del tamaño de estas, siendo el límite un número infinito de ventanas de tamaño infinitesimal, que permitiría conocer la velocidad en cada punto del campo.

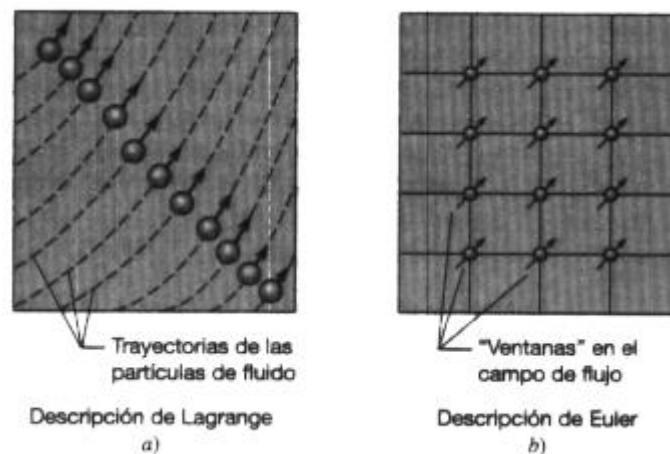


Figura 2.1. Descripciones de Lagrange y de Euler [15].

## 2.2 Resistencia (*drag*) y carga aerodinámica (*lift*)

Una vez descritas las ecuaciones necesarias para poder calcular el campo de velocidades, es necesario definir los parámetros que indican el comportamiento hidrodinámico de un perfil aerodinámico: drag y lift.

La resistencia aerodinámica se define como la fuerza que sufre un cuerpo sólido al desplazarse a través del medio fluido y tiene siempre sentido opuesto a la dirección de la velocidad [14]. Por otro lado, la carga aerodinámica es la fuerza generada sobre un cuerpo sólido al desplazarse a través del medio fluido y es perpendicular a la dirección de la velocidad (ver Figura 2.2). Formalmente ambas poseen la misma expresión:

$$F_n = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_n \quad (2.8)$$

Donde:

- $F_n$ : fuerza en dirección  $n$ ; resistencia aerodinámica en el caso de que la velocidad vaya en el mismo sentido que  $n$  ó carga aerodinámica en el caso de que la velocidad vaya en sentido perpendicular a  $n$  ( $N$ ).
- $\rho$ : densidad del fluido ( $kg/m^3$ ).
- $U$ : velocidad del fluido ( $m/s$ ).
- $A$ : área frontal del cuerpo ( $m^2$ ).
- $C_n$ : coeficiente de resistencia aerodinámica o de sustentación vertical.

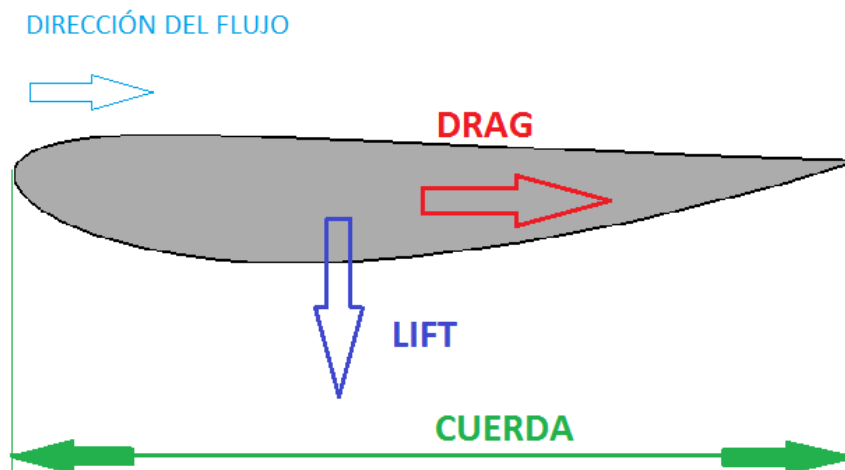


Figura 2.2. Sentido de la resistencia y carga aerodinámica.

En la Figura 2.2 se puede observar el concepto de cuerda de un perfil alar, una línea recta que comienza en el borde de ataque y finaliza en el borde de salida.

## 2.3 Flujo laminar y flujo turbulento

Si entre dos partículas que se encuentran en movimiento existe un gradiente de velocidad, es decir, una partícula se mueve a una mayor velocidad que la otra, aparecen fuerzas tangenciales de fricción entre las mismas que intentan provocar rotación entre dichas partículas. A su vez, la viscosidad trata de impedir la rotación entre dichas partículas y, dependiendo del valor relativo entre las fuerzas de fricción y la viscosidad, tendremos dos estados de flujo [3].

A bajos gradientes de velocidad, las fuerzas de inercia son mayores que las fuerzas de fricción, por lo que las partículas únicamente se desplazarán entre sí, pero no existirá rotación o ésta es muy baja. En este caso, las partículas se desplazarán según trayectorias ordenadas, paralelas y bien definidas. Este caso es el que define al flujo laminar.

Al ir aumentando el gradiente de velocidad, las fuerzas de fricción adquieren mayor relevancia y van provocando la rotación entre las partículas, haciendo que el efecto de la viscosidad vaya perdiendo su importancia. Debido a la rotación de las partículas, estas van cambiando de trayectoria, moviéndose de forma desordenada y chocando entre ellas. Este tipo de flujo es el conocido como flujo turbulento.

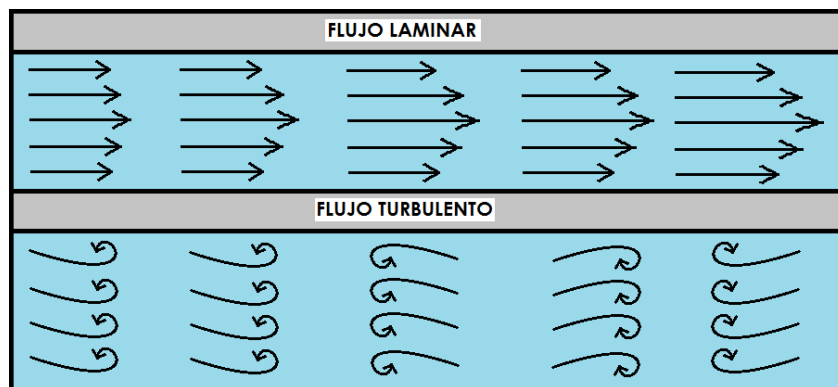


Figura 2.3. Flujo laminar y turbulento en una tubería circular [19].

Para conocer el tipo de flujo, se emplea el número de Reynolds, el cual relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas. Un bajo número de Reynolds indica que las fuerzas viscosas son importantes, por lo que el fluido se encuentra en régimen laminar. Por el contrario, un alto número de Reynolds indica que las fuerzas viscosas son prácticamente despreciables, por lo que el flujo se encuentra en régimen turbulento. El punto en el que se deja de considerar flujo laminar para considerarse turbulento es el de número de Reynolds igual a  $2 \cdot 10^4$ . Este número tiene la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (2.9)$$

Donde:

- $\rho$ : densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ ).
- $U$ : velocidad del fluido ( $\text{m/s}$ ).
- $L$ : longitud característica ( $\text{m}$ ).
- $\mu$ : viscosidad del fluido ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ).

## 2.4 Capa límite

Se trata de una zona donde el movimiento de un fluido es perturbado por la presencia de un sólido que se encuentra en contacto con dicho fluido. En este espacio, el fluido tiene una velocidad relativa respecto al sólido que varía entre 0-99% de la velocidad de la corriente no perturbada [14].

Estudiar el comportamiento de la capa límite es esencial a la hora de conocer cómo trabajarán los elementos aerodinámicos. Si esta capa límite llega a desprenderse, se producirá un aumento de la resistencia aerodinámica y un notable descenso brusco en la carga aerodinámica que estos elementos generan.

La capa límite en flujo laminar es ligeramente más fina que para flujo turbulento. Además, la capa límite turbulenta tiene una importante ventaja sobre la laminar; el flujo laminar va perdiendo progresivamente velocidad a lo largo de la capa límite, pudiendo detenerse o incluso retroceder, haciendo que la capa límite se desprenda y no siga la forma del elemento aerodinámico, con las respectivas consecuencias enumeradas en el párrafo anterior (ver Figura 2.4). Por el contrario, la capa límite turbulenta provoca que parte de la energía cinética de la zona más alejada del sólido sea transmitida hacia el interior, lo que estimula el avance de las zonas que se encuentran más cerca del sólido y, en consecuencia, retrasando el desprendimiento de la capa límite.

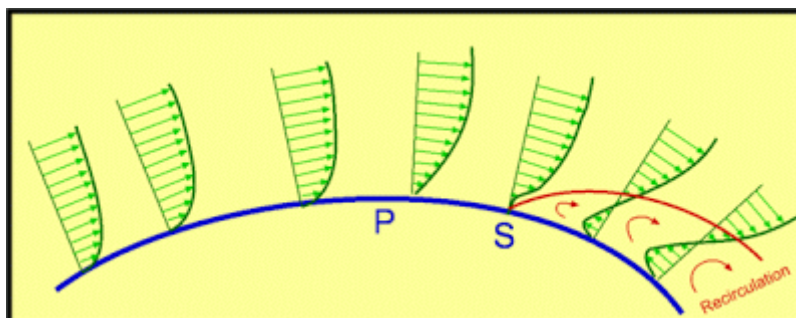


Figura 2.4. Desprendimiento de la capa límite [14].

## 2.5 Ecuaciones de Navier Stokes en forma integral

Son dos ecuaciones que describen el movimiento de un fluido. Debido a que en estos análisis no existen diferencias de temperaturas, sólo se emplearán las ecuaciones que se enuncian a continuación, por lo que no se tendrá en cuenta la ecuación de la energía.

- **Ecuación de la continuidad:** esta ecuación señala que la variación de volumen de un fluido en movimiento es nula [16].

$$0 = \frac{d}{dt} \int_{V_f} \rho dV \quad (2.10)$$

Donde:

- $t$ : tiempo.
  - $V_f$ : volumen fluido en función del tiempo.
  - $\rho$ : densidad del fluido.
  - $V$ : volumen de fluido.
- **Ecuación de la cantidad de movimiento:** El incremento por unidad de tiempo de la cantidad de movimiento dentro de un volumen de control es equivalente al flujo convectivo que entra al volumen de control a través de las paredes, de las fuerzas de presión, de las fuerzas viscosas y de las fuerzas másicas [16].

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f(t)} \rho dV = - \int_{\Sigma f(t)} p \vec{n} d\sigma + \int_{\Sigma f(t)} \tau \vec{n} d\sigma + \int_{V_f(t)} \rho \vec{f}_m dV \quad (2.11)$$

Donde:

- $t$ : tiempo (s).
- $V_f$ : volumen fluido en función del tiempo.
- $\rho$ : densidad del fluido.
- $V$ : volumen de fluido.
- $\Sigma f(t)$ : superficie fluida en función del tiempo.
- $p$ : presión.
- $\vec{n}$ : orientación de la fuerza de presión o de la fuerza viscosa.
- $\sigma$ : superficie.
- $\tau$ : tensor de esfuerzos viscosos.
- $\vec{f}_m$ : fuerzas másicas.



### 3 Simulaciones y diseño de la cascada lateral

La cascada lateral es un conjunto de dos alerones que se instalarán en los laterales del vehículo y que tienen como función reducir la cantidad de aire que llega a las ruedas, para así reducir la resistencia aerodinámica generada por la rotación de las ruedas traseras. También generará carga aerodinámica, lo cual permite aumentar la velocidad de paso por curva del vehículo y mejorar su rendimiento en las pruebas que se dan en circuitos revirados.

Este dispositivo aerodinámico instalará en el espacio permitido por reglamento entre los ejes delantero y trasero (ver Figura 1.7 y Figura 1.8). El punto más bajo de la misma estará a 30 mm sobre el suelo, altura limitada por reglamento, con el fin de maximizar la carga y reducir en lo posible la resistencia aerodinámica que la cascada pueda generar. Por otra parte, la parte más retrasada de la cascada estará adelantada 75 mm respecto de las ruedas traseras, mínima distancia permitida por reglamento, con el fin de recoger la mayor cantidad de aire limpio posible, alejando la cascada en la medida de lo posible de las turbulencias que generen las ruedas delanteras. En la Figura 3.1 se puede ver recuadrada en rojo la cascada lateral que el equipo EITSIB Motorsport instaló en su CAT10E.



Figura 3.1. Ubicación cascada lateral en el CAT10E de EITSIB Motorsport [4].

#### 3.1 Premisas para el diseño

##### 3.1.1 Perfiles que se pueden emplear

Debido al alto coste económico que supone la fabricación de la aerodinámica del vehículo, los perfiles que se pueden emplear, con el fin de ahorrar costes, deberán ser los mismos que se usan en el alerón delantero del coche, a excepción del perfil principal que por su papel clave en el funcionamiento global de la cascada, podrá tener una cuerda diferente.

Los perfiles son los siguientes:

- **Para slat:** GOE570 con cuerda 150, FX74\_CL5\_140 con cuerda 150 mm.
- **Para perfil principal:** FX74\_CL5\_140 con cuerda a determinar.
- **Para perfiles secundarios y posible dúplex:** FX74\_CL5\_140 con cuerda 150 mm.

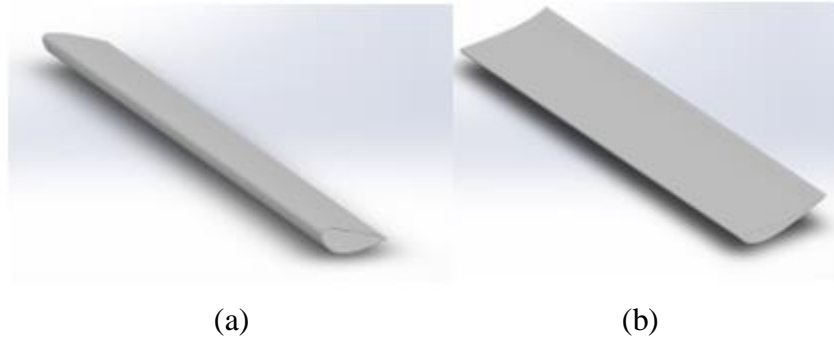


Figura 3.2. (a) GOE570 con cuerda 130 mm. (b) FX74\_CL5\_140 con cuerda 150 mm.

En este apartado en primer lugar se analizarán todos los perfiles de estudio según el ángulo de ataque. Para ello es necesario realizar previamente un análisis de convergencia de mallas para asegurar que los resultados obtenidos en las simulaciones se ajustan a la realidad.

Posteriormente se realizará un estudio en el que se combinarán los diferentes perfiles que integrarán la cascada lateral, buscando el conjunto que mejores resultados aerodinámicos arroja. Al igual que en el caso anterior, previamente a las simulaciones realizadas, se realizará un estudio de la convergencia de mallas que permitan asegurar que los resultados obtenidos son válidos.

## 3.2 Software empleado

### 3.2.1 Diseño de los elementos de la cascada lateral

Como primer paso a las simulaciones tridimensionales, se recurre al uso del software CAD (*Computer Aided Design*) *Solidworks 2016* para la creación de los perfiles aerodinámicos. Los perfiles empleados se encuentran en la página web de *Airfoil Tools* [1], web de uso recurrente en el campo de la ingeniería aeroespacial y de los equipos de la competición Formula Student, en la que se pueden descargar los perfiles normalizados con el objetivo de ser reconstruidos en los programas de diseño asistido por ordenador.

Dado que estos perfiles no tienen unas tolerancias que permitan la unión puntual de la zona superior con la inferior, se les elimina el punto correspondiente al borde de salida para que se asemejen a la realidad. Además, la eliminación de este punto y la posterior reconstrucción con *Solidworks 2016* del borde de salida evitan problemas de mallado. Así pues, se pasa de tener curvas cerradas a curvas abiertas.

Con la ayuda de *Matlab R2017b*, se crea un programa (ver anexo) en el que una vez cargado el perfil deseado, se le puede crear con la cuerda y ángulo de ataque deseados, además de poder insertarlos con el gap y overlap, (distancias horizontal y vertical entre borde de salida de un perfil y borde de ataque del siguiente perfil respectivamente) deseados respecto de sus predecesores.

Seguidamente en *Solidworks 2016* se cierra el perfil insertando una curva deformable de extremo a extremo de la curva y se la hace tangente a dicha curva, quedando el perfil perfectamente cerrado. Posteriormente, se extruye el perfil la distancia deseada en la dirección normal al plano en el que se encuentra la curva. Por último, se ensambla con el resto de los perfiles, resultando configuraciones como el ejemplo que se puede observar en la Figura 3.3:

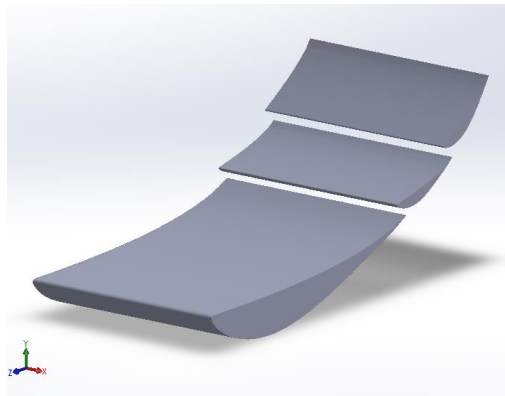


Figura 3.3. Configuración de perfiles tras ensamblaje.

De esta forma se crean todos los perfiles del coche y se ensamblan con el resto de los elementos que componen el vehículo, incluidos endplates y gurney flaps que puedan formar parte de la cascada lateral. No obstante, para las simulaciones aerodinámicas que se van a realizar, se suprimen numerosos elementos de dirección y suspensión o se simplifican, tal y como ocurre con el bloque motor o las ruedas; esta supresión o simplificación de elementos no tiene apenas relevancia en las simulaciones resultantes, pero sí que tiene una elevada reducción del coste computacional de las simulaciones que se harán en *Simscale*.

### 3.2.2 Creación de mallas en *Simscale*

*Simscale* es un programa CAE online (*Computer Aided Engineering*), software ampliamente utilizado en la Formula SAE por numerosos equipos. Posee 3 módulos diferentes: térmico, análisis por elementos finitos y análisis computacional de fluidos (CFD), siendo este último el que se empleará en este estudio.

Se comienza insertando las geometrías a estudiar en el programa. Posteriormente, se crea la malla de manera manual, ajustando en primer lugar los controles de calidad de malla, el número de procesadores que se desean emplear en *Simscale* y el número de celdas en cada dirección del sistema de coordenadas XYZ. Seguidamente se encierra el perfil en dos prismas rectangulares: el primero, llamado Background Box, es un prisma rectangular

de un tamaño mucho mayor que el objeto de estudio, que nos permitirá posteriormente analizar cómo se comportan las partículas fluidas; el segundo, llamado Cartesian Box, se encuentra dentro del anterior volumen y encierra al objeto de estudio de una manera mucho más ajustada que el anterior prisma, que nos servirá para analizar la carga y resistencia aerodinámica que genera el objeto de estudio.

La diferencia principal entre ambos volúmenes es que el número de celdas en la Cartesian Box es mucho mayor, para así tener una mayor precisión a la hora de simular las fuerzas que genera el movimiento del vehículo. Sin embargo, la Background Box, no precisa de un número de celdas tan elevado, ya que su función es la de analizar el movimiento de las partículas fluidas, por lo que se reduce el número de celdas respecto a la Cartesian Box para no tener un coste computacional innecesario. En la siguiente figura se pueden apreciar ambos volúmenes, siendo el azulado la Cartesian Box y el grisáceo la Background Box.

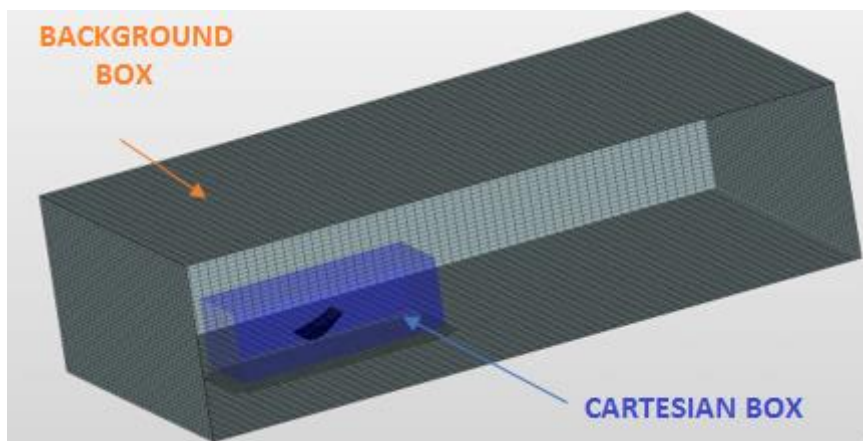


Figura 3.4. Mallado de perfil FX74\_CL5\_140 con cuerda 150 mm.

Nótese que el perfil se encuentra muy adelantado para poder analizar posteriormente las líneas de corriente que genera el perfil.

No obstante, para los diferentes elementos sólidos que forman el conjunto a simular, es necesario indicar al programa qué refinamientos de malla deben seguir los distintos componentes del coche, así como el número de capas y las características de estas que deben tener los distintos elementos que integran el vehículo. Así pues, los perfiles y los distintos elementos de la cascada lateral tendrán un mallado muy fino debido a que son las partes en las que se precisa tener un mayor detalle, ligeramente más grueso para los neumáticos, más grueso para los elementos que no son de interés de este estudio (monocasco, alerones delantero/trasero) y muy grueso para el piloto. En la Figura 3.5 se pueden apreciar los distintos grosores de malla que poseen los distintos elementos que conforman el vehículo.

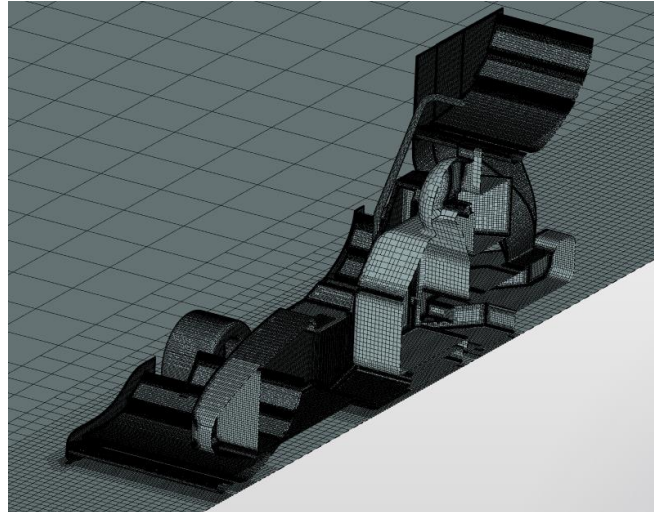


Figura 3.5. Diferencias de mallado para los distintos elementos del vehículo.

Los refinamientos de malla empleados son los siguientes:

- **Refinamiento de región:** para la Cartesian Box se aplica un refinamiento de nivel 3, 1 m de distancia y con dirección hacia dentro. Esto significa que las zonas que se encuentren a 1 m de distancia de esta región y que se encuentren en el interior de la Cartesian Box tendrán un mallado de, como mínimo, nivel 3 (tendrá un mallado de nivel superior si otro refinamiento de malla así lo delimita).
- **Refinamiento de superficie:** la superficie de los distintos elementos que conforman el monoplaza tendrán diferentes niveles de refinamiento según su interés en las simulaciones:
  1. Piloto: nivel mínimo 4, nivel máximo 4.
  2. Bloque motor y monocasco: nivel mínimo 5, nivel máximo 5.
  3. Ruedas delanteras/traseras y alerones delantero/trasero: nivel mínimo 6, nivel máximo 7.
  4. Cascada lateral: nivel mínimo 6, nivel máximo 8.
- **Refinamientos de capa:** crea caras alrededor de las superficies de estudio que están en contacto con el fluido.
  1. Suelo: 3 capas, relación de expansión para el grosor de la capa: 3, espesor de las 3 capas: 0.48 m, espesor mínimo de la capa total: 0.5 mm.
  2. Piloto, bloque motor, monocasco y ruedas delanteras/traseras: 4 capas, relación de expansión para el grosor de la capa: 1.1, espesor de las 3 capas: 0.28 m, espesor mínimo de la capa total: 0.5 mm.
  3. Alerones delantero/trasero y cascada lateral: 4 capas, relación de expansión para el grosor de la capa: 1.1, espesor de las 3 capas: 0.45 m, espesor mínimo de la capa total: 0.5 mm.
- **Refinamiento de bordes:** este refinamiento permite crear una malla más fina cerca de los bordes. El ángulo seleccionado para que se ejecute este refinamiento es de 150°.



### 3.2.3 Simulaciones en *Simscale*

Tras finalizar el mallado se pasa a la simulación. En primer lugar, se le indica al software que el volumen que encierra la malla, a excepción de los elementos sólidos introducidos, es aire de densidad  $1.225 \text{ kg/m}^3$ . Posteriormente se le indica al programa las condiciones de contorno que tiene el volumen de control seleccionando las diferentes caras de la Background Box, tal y como se puede apreciar en la Figura 3.6:

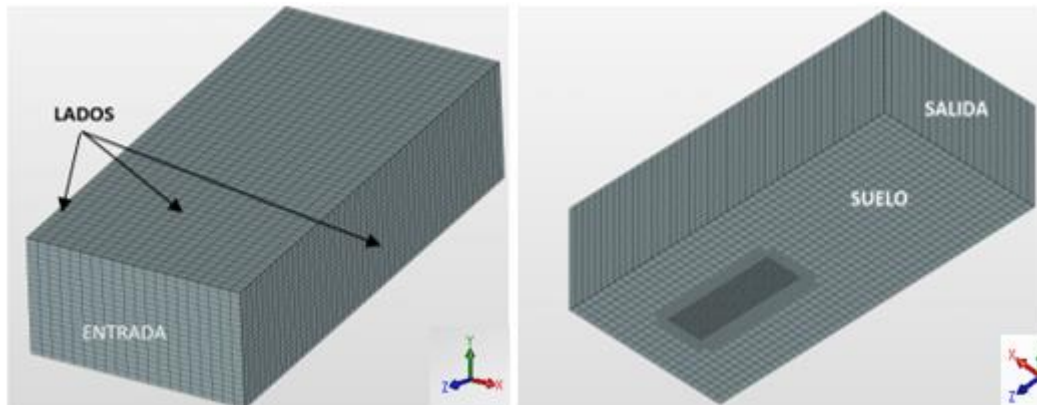


Figura 3.6. Diferentes caras de la Background Box.

Las variables introducidas en las distintas caras y elementos del vehículo son las siguientes:

- **Cara de entrada:** velocidad de entrada en la dirección z de  $-16.6667 \text{ m/s}$ .
- **Cara de salida:** presión de salida con valor fijo de  $0 \text{ Pa}$ .
- **Caras laterales y techo (lados):** se definen las caras como de muro y se selecciona la opción “*slip*” para que la corriente deslice, para evitar la fricción con las paredes.
- **Cara inferior (suelo):** se define esta cara como un muro en movimiento a una velocidad en la dirección z de  $-16.6667 \text{ m/s}$ .
- **Ruedas:** se las define como un muro en rotación alrededor de un eje en dirección x a una velocidad angular de  $85.911 \text{ rad/s}$ .
- **Elementos que componen el monoplaza (a excepción de las ruedas):** se los define como muros que no se encuentran en movimiento y que tienen fricción con el fluido.

El aire irrumpe por la cara llamada entrada a la velocidad introducida en la simulación y se escapa por la cara de salida. La superficie llamada suelo actúa como pared, por lo que las partículas fluidas del aire no atravesarán dicha cara, al contrario que las superficies denominadas lados, en las que, si el aire choca con ellas, sí que conseguirá atravesarlas.

Indicar que la malla empleada para la simulación del vehículo completo es una malla que corta al coche por su plano de simetría, para así reducir el coste computacional de mallado y simulación al no tener que hacer una malla el doble de grande. Para ello, es necesario indicar en Simscale que este plano de simetría del coche es una cara simétrica, por lo que ahora se pasa de las 3 caras “lado” empleadas en la simulación de perfiles a tener 2 caras “lado” junto con otra cara llamada “simétrica” correspondiente al plano de simetría del vehículo.

Por otro lado, los objetos de estudio son considerados como un muro; de esta manera, las partículas fluidas no los atravesarán. Además, en el caso de la simulación completa del vehículo, se le añaden las ruedas como elementos en rotación a una velocidad angular determinada por la velocidad de desplazamiento del vehículo y del radio de estas. Todas estas consideraciones influirán en el campo de velocidades del fluido que llegará a los distintos perfiles de la cascada lateral.

Por último, se seleccionan los objetos de estudio para los que el programa debe de calcular la distribución de velocidades, presiones y fuerzas generadas.



### 3.3 Resultados de las simulaciones

En este subapartado, se simularán en *Simscale* los distintos perfiles aerodinámicos que se emplearán en la cascada lateral. Para ello, en primer lugar, se realizará un análisis de convergencia de malla que permita asegurar que los resultados obtenidos en las simulaciones son correctos. Una vez verificada que la malla es adecuada, se mostrarán y analizarán los resultados obtenidos en las simulaciones mediante el empleo de gráficas comparativas entre el coeficiente de sustentación vertical,  $C_l$ , y el coeficiente de resistencia aerodinámica ( $C_d$ ) en función del ángulo de ataque.

Una vez analizados todos los perfiles, se analizarán diferentes configuraciones de la cascada lateral para encontrar la que mejor se adapta al vehículo. Al igual que en los casos anteriormente descritos, se verificará la convergencia de malla que permita asegurar que los resultados obtenidos se ajustan a la realidad. Por último, se mostrarán y estudiarán los resultados obtenidos en las simulaciones mediante el empleo de tablas en las que se mostrará la carga y resistencia aerodinámica generadas por cada configuración, además de la eficiencia aerodinámica que posee el conjunto.

#### 3.3.1 Simulaciones de los perfiles aerodinámicos

##### 3.3.1.1 *Análisis de la sensibilidad de la malla*

En primer lugar, se procede a estudiar el volumen de control en el que se simularán los distintos perfiles aerodinámicos. Es conocido que a mayor número de elementos tenga la malla, mayor será el coste computacional de las simulaciones. Teniendo en cuenta el gran número de simulaciones que se necesitarán para diseñar la cascada, es interesante conocer el número de elementos idóneo para que la simulación tenga una adecuada precisión a la vez que un coste computacional lo más bajo posible para así hacer más productivo el proceso.

Este análisis de convergencia de malla se ha realizado para todos los perfiles que aparecen en el subapartado 3.3.1.2. Para evitar ensuciar el contenido de esta memoria con la reiteración del mismo análisis de sensibilidad de malla para cada uno de los distintos perfiles, sólo se ha incluido en esta memoria el realizado al perfil FX74\_CL5\_140 de cuerda 150 mm.

La malla empleada para la simulación de los perfiles aerodinámicos tiene unas dimensiones de 4.3 x 2.3 x 9 metros. El perfil empleado para este estudio es el FX74\_CL5\_140 de cuerda 150 mm, la velocidad es de 60 km/h y el ángulo de ataque de 0°, situado en una posición centrada y adelantada en el interior de la malla, tal y como se puede apreciar en la Figura 3.7.

Indicar que el proceso seguido a continuación para el perfil FX74\_CL5\_140 es el mismo proceso que se ha realizado en los demás perfiles.

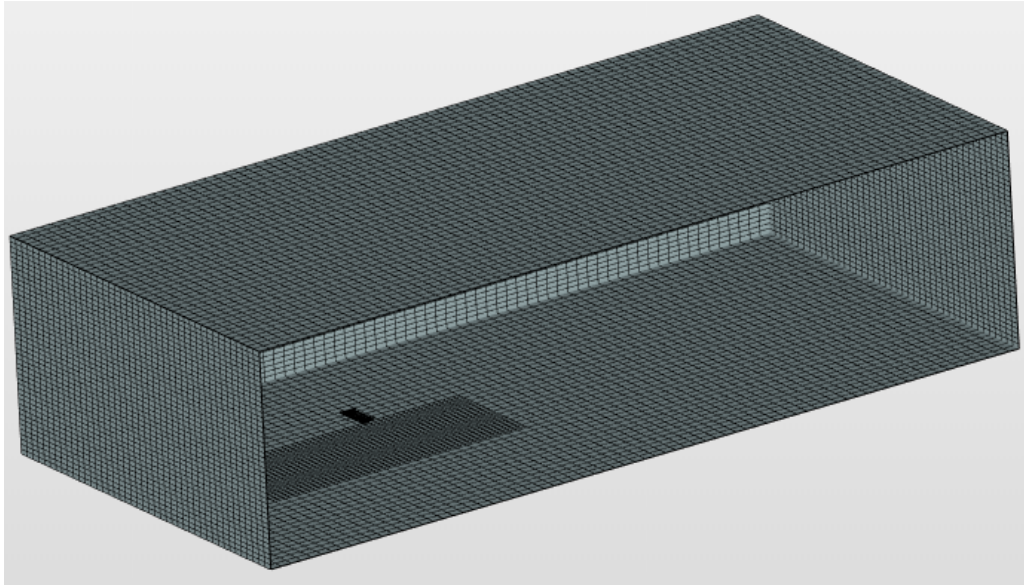


Figura 3.7. Situación del perfil aerodinámico en el interior de la malla.

Analizando los resultados obtenidos en la Figura 3.8 se muestra una clara inestabilidad de los resultados para mallas de menos de 1500000 elementos, que se va reduciendo conforme se va incrementando el número de volúmenes que contiene la malla. A partir de esta cifra, los resultados convergen, por lo que, para una correcta precisión en los datos obtenidos y el menor coste computacional posible, se empleará una malla para la simulación de todos perfiles con las siguientes características:

- **Tamaño de la malla:** 4.3 x 2.3 x 9 metros.
- **Número de celdas en dirección x:** 44.
- **Número de celdas en dirección y:** 44.
- **Número de celdas en dirección z:** 74.

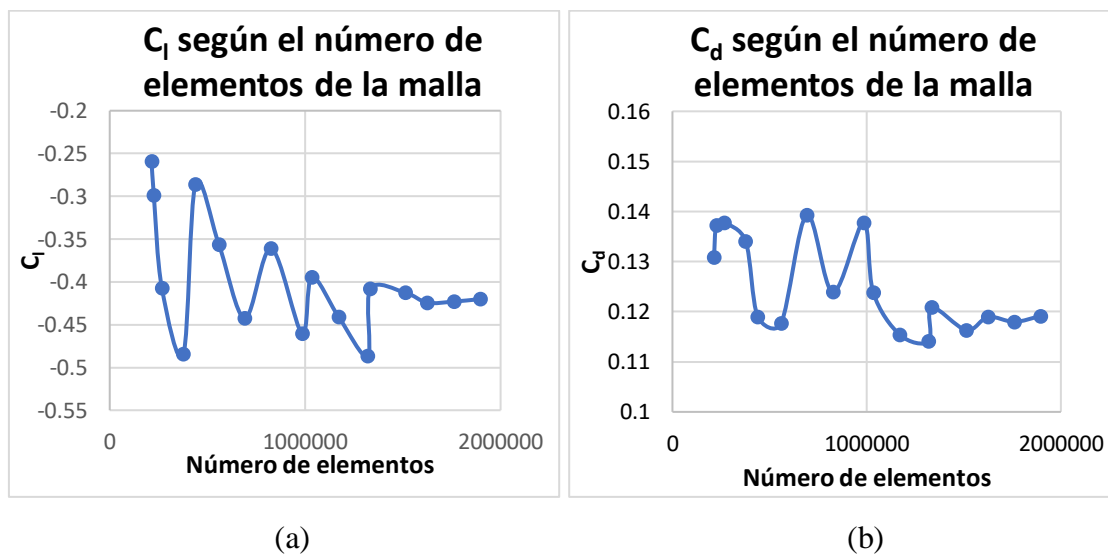


Figura 3.8. Para el perfil alar: (a)  $C_l$  según el número de elementos de la malla. (b)  $C_d$  según el número de elementos de la malla.

### 3.3.1.2 Análisis de los resultados de las simulaciones

En este subapartado se analizarán, para cada uno de los perfiles de estudio, los resultados de carga y resistencia aerodinámicas, así como los coeficientes  $C_l$ ,  $C_d$  y la relación  $C_l / C_d$  que se han obtenido de las simulaciones realizadas en *Simscale* en función del ángulo de ataque.

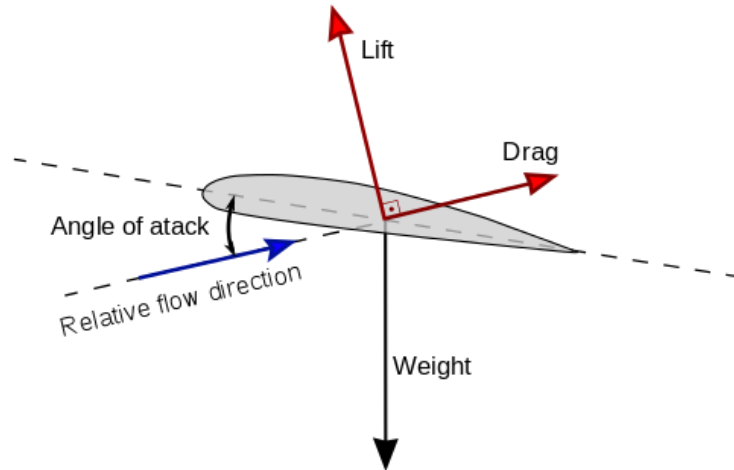


Figura 3.9. Ángulo de ataque, lift, drag y peso para el perfil alar de un avión [6].

#### 3.3.1.2.1 Perfil GOE570 de cuerda 130 mm

Este perfil será evaluado como posible slat (perfil con ángulo de ataque negativo), por lo que todos los cálculos se han realizado para un intervalo de ángulos  $[-26^{\circ}, 0^{\circ}]$ , intervalo en el que se considera en un primer momento que el perfil puede arrojar resultados satisfactorios. La velocidad de corriente será de 60 km/h (velocidad establecida por el Departamento de Aerodinámica de Formula UC3M para las simulaciones). Los resultados se plasman en la Tabla 3.1, Figura 3.10 y Figura 3.11.

Tabla 3.1. Fuerzas y coeficientes para el perfil GOE570 con cuerda 130 mm según el ángulo de ataque.

Ángulo de ataque (°)	Cuerda (mm)	Área proyectada <sup>1</sup> (m <sup>2</sup> )	Lift (N)	Drag (N)	C <sub>l</sub>	C <sub>d</sub>	C <sub>l</sub> /C <sub>d</sub>
-30	130	0,03999	-0,1696	3,425	-0,02551	0,5153	-0,04951
-28	130	0,04057	-0,1678	3,284	-0,02488	0,4870	-0,05109
-26	130	0,04115	-0,5421	2,894	-0,07927	0,4232	-0,1873
-24	130	0,04169	-0,4299	2,932	-0,06205	0,4233	-0,1466
-22	130	0,04223	-0,7852	2,858	-0,1118	0,4072	-0,2747
-20	130	0,04284	-0,8451	2,598	-0,1187	0,3649	-0,3253
-18	130	0,04324	-0,9124	2,449	-0,1269	0,3409	-0,3724
-16	130	0,04363	-1,544	2,422	-0,2129	0,3341	-0,6372
-14	130	0,04403	-1,521	2,304	-0,2079	0,3149	-0,6602
-12	130	0,04435	-1,667	2,126	-0,2262	0,2885	-0,7838
-10	130	0,04464	-1,472	2,008	-0,1984	0,2707	-0,7330
-8	130	0,04486	-1,009	1,890	-0,1351	0,2536	-0,5335
-6	130	0,04504	-0,5979	1,808	-0,07989	0,2416	-0,3306
-4	130	0,04518	-0,7533	1,992	-0,1003	0,2654	-0,3780
-2	130	0,04522	-0,9856	1,685	-0,1312	0,2242	-0,5851
0	130	0,04525	-0,6378	1,585	-0,0848	0,2108	-0,4023

<sup>1</sup> Indicar que el área proyectada se ha obtenido mediante el software *3D-Tool*. Este programa permite realizar cálculos y mediciones sobre los sólidos que previamente le son introducidos. Para este caso, tras introducir el perfil, se selecciona su vista proyectada y, posteriormente, se le encierra en una caja en la que se puede medir la altura y anchura de esta. Realizando el producto entre ambos factores, se obtiene el área proyectada del perfil requerida.

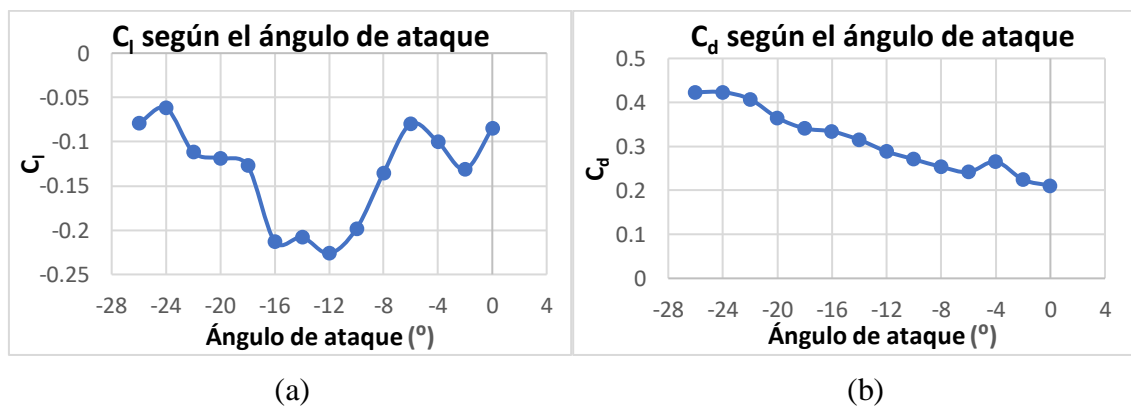


Figura 3.10. Para perfil GOE570 con cuerda 130 mm: (a) C<sub>l</sub> según el ángulo de ataque. (b) C<sub>d</sub> según el ángulo de ataque.

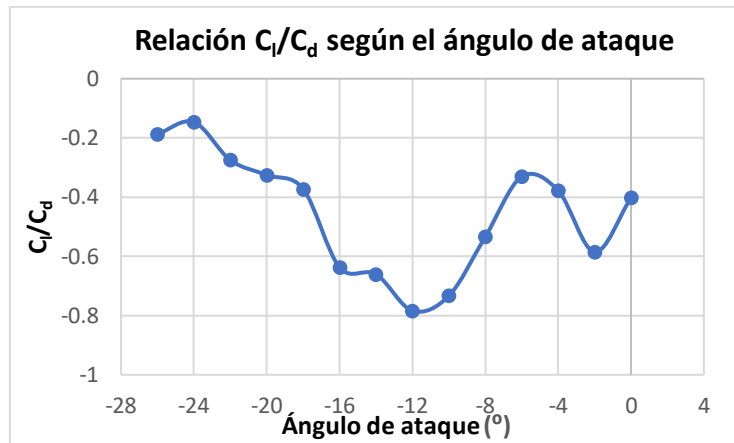


Figura 3.11. Relación  $C_l/C_d$  según el ángulo de ataque para perfil GOE570 con cuerda 130 mm.

En teoría, el slat al ir delante del perfil principal permite aumentar la carga aerodinámica de los perfiles que le siguen a la vez que consigue retrasar el desprendimiento de la capa límite. Por ello, en el slat, no es tan importante el hecho de buscar un perfil que genere mucha sustentación y poca resistencia aerodinámica, sino que se ha de buscar un perfil que mejore el funcionamiento del conjunto de la cascada.

No obstante, en la Figura 3.10 (a) se puede contemplar cómo ángulos de ataque que se encuentren en el intervalo  $[-16^\circ, -10^\circ]$  son los que mejor  $C_l$  arrojan y, por ende, los más interesantes para usar en la cascada. Pasando a la Figura 3.10 (b) se observa lo esperado: a medida que se va reduciendo el ángulo de ataque, el  $C_d$  aumenta. Al observar la Figura 3.11 se llega a la conclusión de que el slat, por sí solo, tiene un mejor funcionamiento para un ángulo de ataque de  $-12^\circ$ .

#### 3.3.1.2.2 Perfil FX74\_CL5\_140 de cuerda 150 mm

Este perfil será estudiado tanto como posible slat, como para flap secundario y terciario y posible dúplex. Será evaluado en el intervalo  $[-26^\circ, 70^\circ]$  y a una velocidad de corriente de 60 km/h. El estudio de los ángulos negativos va dirigido al uso como slat del perfil, ángulos en el intervalo  $[0^\circ, 20^\circ]$  al uso del dúplex y ángulos superiores a  $20^\circ$  se estudian para su implementación como flap secundario y terciario. Los resultados obtenidos se plasman en la Tabla 3.2, Figura 3.12 y Figura 3.13.

Tabla 3.2. Fuerzas y coeficientes para el perfil FX74\_CL5\_140 con cuerda 150 mm según el ángulo de ataque.

Ángulo de ataque (°)	Cuerda (mm)	Área proyectada (m <sup>2</sup> )	Lift (N)	Drag (N)	C <sub>l</sub>	C <sub>d</sub>	C <sub>l</sub> / C <sub>d</sub>
-26	150	0,04852	3,170	3,387	0,3931	0,4201	0,9358
-24	150	0,04928	3,288	3,355	0,4015	0,4097	0,9800
-22	150	0,05000	2,631	2,996	0,3166	0,3605	0,8783
-20	150	0,05068	2,378	2,772	0,2822	0,3291	0,8577
-18	150	0,05126	2,483	2,568	0,2915	0,3015	0,9669
-16	150	0,05180	1,949	2,305	0,2264	0,2677	0,8458
-14	150	0,05231	1,772	2,046	0,2038	0,2354	0,8661
-12	150	0,05270	1,415	1,848	0,1616	0,2109	0,7659
-10	150	0,0531	1,129	1,655	0,1279	0,1875	0,6823
-8	150	0,05335	-0,0636	1,453	-0,007175	0,1638	-0,04379
-6	150	0,05360	-0,6235	1,229	-0,06999	0,1380	-0,5071
-4	150	0,05375	-1,294	1,156	-0,1448	0,1294	-1,119
-2	150	0,05386	-2,477	1,117	-0,2767	0,1248	-2,216
0	150	0,05389	-3,949	1,033	-0,4410	0,1153	-3,823
5	150	0,05368	-7,644	1,656	-0,8569	0,1856	-4,617
10	150	0,05310	-9,229	2,116	-1,045	0,2398	-4,360
15	150	0,05209	-12,38	3,479	-1,429	0,4019	-3,557
20	150	0,05069	-13,41	4,402	-1,591	0,5226	-3,045
25	150	0,04892	-13,90	5,426	-1,709	0,6674	-2,562
27,5	150	0,04792	-8,730	4,417	-1,096	0,5547	-1,976
30	150	0,04676	-9,095	4,932	-1,170	0,6347	-1,844
32,5	150	0,04558	-9,431	5,539	-1,245	0,7314	-1,7025
35	150	0,04428	-9,130	6,108	-1,241	0,8301	-1,4947
37,5	150	0,04291	-8,923	6,199	-1,251	0,8694	-1,439
40	150	0,04143	-8,973	7,304	-1,303	1,061	-1,228
42,5	150	0,03992	-8,902	7,225	-1,341	1,089	-1,232
45	150	0,03830	-7,707	6,718	-1,211	1,055	-1,147
47,5	150	0,03661	-8,002	7,598	-1,315	1,249	-1,053
50	150	0,03488	-8,112	8,552	-1,399	1,475	-0,9485
52,5	150	0,03304	-7,515	8,438	-1,368	1,536	-0,8906
55	150	0,03117	-6,381	8,238	-1,232	1,590	-0,7746
57,5	150	0,02923	-6,597	9,135	-1,358	1,880	-0,7222
60	150	0,02725	-6,262	9,379	-1,383	2,071	-0,6677
62,5	150	0,02523	-5,891	9,836	-1,405	2,345	-0,5989
65	150	0,02318	-5,340	10,18	-1,386	2,643	-0,5245
70	150	0,01911	-4,597	10,93	-1,447	3,439	-0,4208

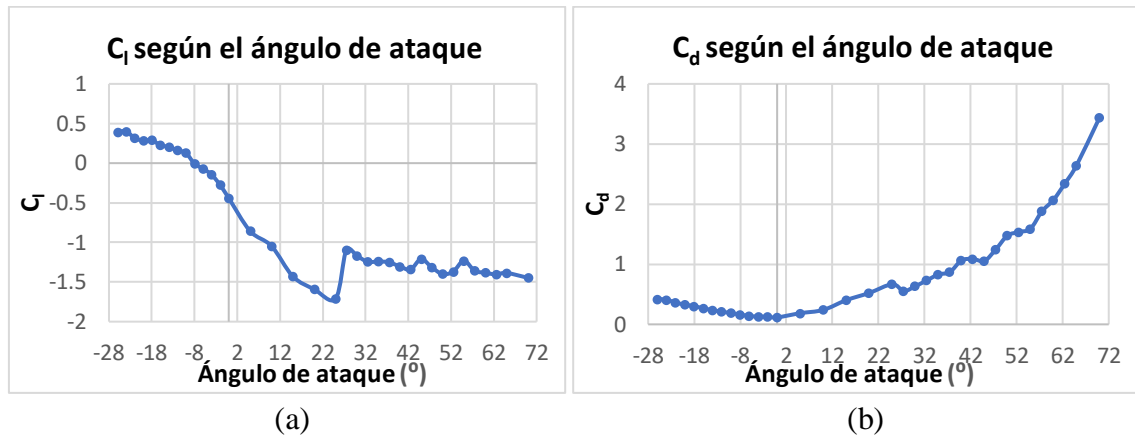


Figura 3.12. Para perfil FX74\_CL5\_140 con cuerda 150 mm: (a)  $C_l$  según el ángulo de ataque. (b)  $C_d$  según el ángulo de ataque.

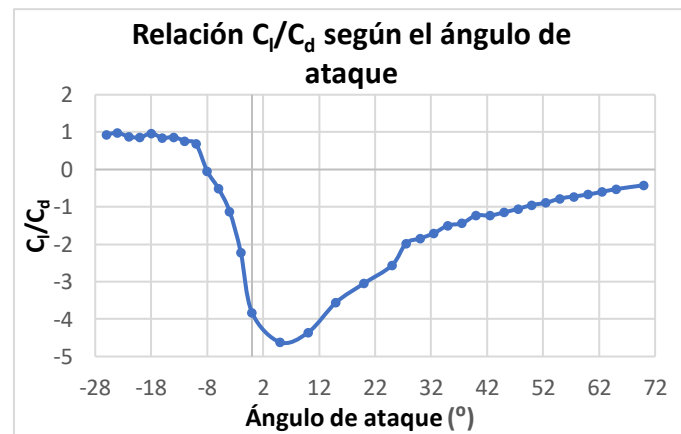


Figura 3.13. Relación  $C_l/C_d$  según el ángulo de ataque para perfil FX74\_CL5\_140 con cuerda 150 mm.

Atendiendo al comportamiento del perfil como slat, los resultados son muy pobres en comparación a lo observado con el perfil GOE570. A partir de los  $-8^\circ$ , el perfil provoca elevación en vez de apoyo aerodinámico, por lo que no es nada interesante su uso en comparación con el perfil anteriormente mencionado, aunque se deberá de probar con el conjunto del coche ya que podría mejorar el conjunto en un grado lo suficientemente elevado como para solventar el mal comportamiento que tiene el perfil por sí solo.

Pasando a su uso como flap secundario y terciario, se observa en la Figura 3.13 que en el intervalo  $[0^\circ, 12^\circ]$  es donde mejor relación  $C_l/C_d$  posee el perfil, aunque es para ángulos mayores, en torno a los  $25^\circ$ , donde mejores  $C_l$  tiene este perfil (véase Figura 3.12 (a)) puesto que genera mucha más sustentación vertical, aumentando en consecuencia la resistencia aerodinámica y, por ende, el  $C_d$  tal y como se muestra en la Figura 3.12 (b).



Sin embargo, por la influencia de un perfil principal con una cuerda mucho mayor por delante de estos perfiles junto con la influencia de las ruedas delanteras y alerón delantero, se intuye que se precisarán ángulos de ataque mayores a los obtenidos, dado que estos se han obtenido para un flujo de aire limpio y constante, sin otros elementos que puedan alterar su funcionamiento.

### 3.3.1.2.3 Perfil FX74\_CL5\_140 de cuerda 570 mm

Este perfil se evaluará en el intervalo  $[0^{\circ}, 35^{\circ}]$  con una corriente de 60 km/h para su uso como posible perfil principal, es por ello por lo que no se estudiará para valores superiores a  $35^{\circ}$ , pues implicarían tanto grandes ángulos de ataque para los perfiles que le sucederían como un posible desprendimiento de la cama límite en este perfil. Se evaluará con esta cuerda por ser la máxima cuerda admisible por tamaño para la cascada lateral, debido a que, en caso de emergencia, al saltar el piloto del coche, podría pisar los perfiles y partirlos. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.3, Figura 3.14, Figura 3.15.

Tabla 3.3. Fuerzas y coeficientes para el perfil FX74\_CL5\_140 con cuerda 570 mm según el ángulo de ataque.

Ángulo de ataque ( $^{\circ}$ )	Cuerda (mm)	Área proyectada ( $m^2$ )	Lift (N)	Drag (N)	$C_l$	$C_d$	$C_l/C_d$
0	570	0,2048	-6,985	3,252	-0,2052	0,0955	-2,148
1	570	0,2047	-7,585	3,230	-0,2229	0,0949	-2,348
2	570	0,2047	-9,010	3,444	-0,2649	0,1012	-2,616
3	570	0,2045	-8,792	3,196	-0,2587	0,0940	-2,751
4	570	0,2043	-12,04	4,047	-0,3547	0,1192	-2,976
5	570	0,2040	-14,56	4,704	-0,4295	0,1388	-3,095
6	570	0,2037	-13,54	4,136	-0,4001	0,1222	-3,274
7	570	0,2033	-16,75	5,172	-0,4959	0,1531	-3,239
8	570	0,2028	-18,83	5,872	-0,5589	0,1742	-3,208
9	570	0,2023	-20,21	6,372	-0,6010	0,1895	-3,172
10	570	0,2018	-22,36	7,323	-0,6668	0,2183	-3,053
11	570	0,2011	-23,17	7,549	-0,6934	0,2259	-3,069
12	570	0,2004	-25,23	8,589	-0,7576	0,2579	-2,937
13	570	0,1996	-24,94	8,399	-0,7518	0,2531	-2,969
14	570	0,1988	-25,31	8,573	-0,7662	0,2594	-2,953
15	570	0,1980	-26,47	9,193	-0,8046	0,2794	-2,879
16	570	0,1970	-29,03	10,69	-0,8865	0,3266	-2,715
18	570	0,1950	-31,88	12,55	-0,9839	0,3875	-2,539
20	570	0,1927	-33,04	13,64	-1,032	0,4261	-2,421
22,5	570	0,1894	-36,00	15,89	-1,144	0,5047	-2,266
25	570	0,1859	-37,52	17,38	-1,215	0,5627	-2,158
27,5	570	0,1819	-39,44	19,13	-1,304	0,6326	-2,061
30	570	0,1777	-40,55	21,41	-1,373	0,7248	-1,894
35	570	0,1683	-47,46	30,89	-1,697	1,105	-1,537

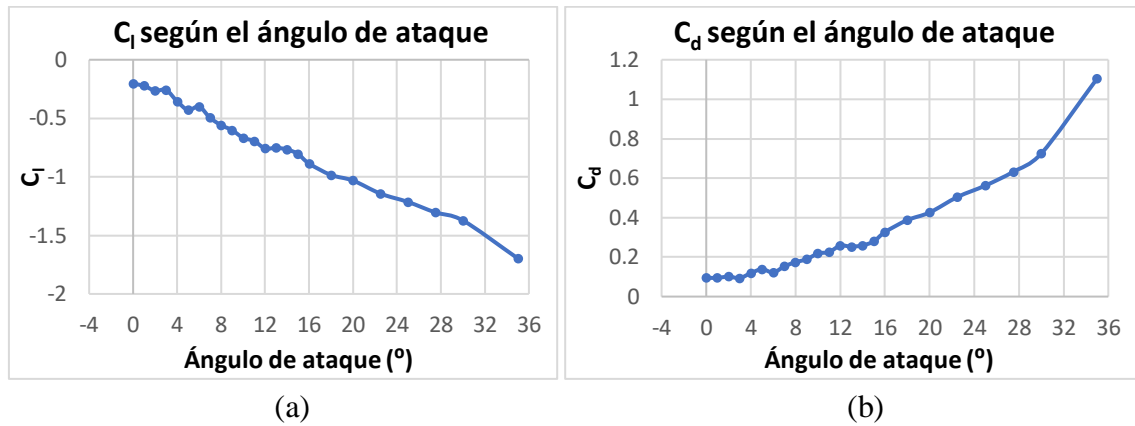


Figura 3.14. Para perfil FX74\_CL5\_140 con cuerda 570 mm: (a)  $C_l$  según el ángulo de ataque. (b)  $C_d$  según el ángulo de ataque.

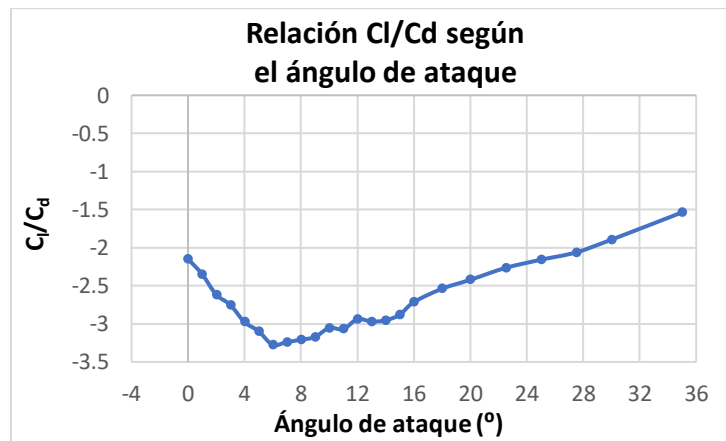


Figura 3.15. Relación  $C_l/C_d$  según el ángulo de ataque para perfil FX74\_CL5\_140 con cuerda 570 mm.

Para este caso, carga aerodinámica y resistencia aerodinámica evolucionan de una manera similar y casi lineal. A medida que se va aumentando el ángulo de ataque, se genera mayor apoyo aerodinámico y, a su vez, mayor resistencia aerodinámica. Para evitar la generación de una elevada resistencia aerodinámica, se deberá recurrir al uso de perfiles con ángulos de ataque comprendidos en el intervalo  $[6^\circ, 14^\circ]$ , pues son los que mejor cociente  $C_l/C_d$  arrojan tal y como se puede ver en la Figura 3.15.

Aunque la mejor relación  $C_l/C_d$  se sitúa para un ángulo de ataque de  $6^\circ$ , la carga aerodinámica generada por un perfil con ángulo de ataque de  $12^\circ$ , es de un 53% mayor, por lo que se deberá evaluar si se desea generar carga aerodinámica minimizando la resistencia generada o si, por el contrario, se desea maximizar la carga aerodinámica generada teniendo un cierto control sobre la resistencia producida.

### 3.3.1.3 Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos, el ángulo de ataque óptimo para el perfil GOE570 con cuerda 130 mm es de  $-12^\circ$  para su uso como slat, por ser el ángulo de ataque que mayor carga aerodinámica genera a la vez que mayor eficiencia aerodinámica.

Para el perfil FX74\_CL5\_140 de cuerda 150 mm, la mayor eficiencia se consigue para un ángulo de ataque de  $5^\circ$ , aunque para ángulos ligeramente mayores de  $15^\circ$  se consigue duplicar la carga aerodinámica generada reduciendo un 20% la eficiencia, por lo que el aumento de carga generado compensaría en parte la resistencia generada. Este intervalo  $[5^\circ, 15^\circ]$  será el intervalo en el que se deberá estudiar la inclusión del slat.

En cuanto al uso de este perfil FX74\_CL5\_140 como slat, empeora claramente los resultados obtenidos del perfil GOE570, provocando elevación en vez de apoyo aerodinámico a partir de los  $-8^\circ$ . Atendiendo al uso de este perfil como perfil secundario y terciario, el ángulo óptimo en cuanto a eficiencia aerodinámica se sitúa en  $25^\circ$ , aunque es previsible que ángulos del perfil principal acusados provoquen que haya que alcanzar ángulos mayores para obtener un buen funcionamiento del conjunto. Conforme vamos aumentando el ángulo de ataque, la eficiencia disminuye, puesto que la carga generada permanece constante mientras que la resistencia aerodinámica aumenta considerablemente.

Por último, el perfil FX74\_CL5\_140 de cuerda 570 mm obtiene unos buenos resultados en el intervalo  $[6^\circ, 14^\circ]$ , puesto que la eficiencia aerodinámica permanece constante, teniendo su máxima eficiencia para  $6^\circ$ . Por ende, se deberá estudiar utilizar un perfil principal que tenga un ángulo de ataque contenido en dicho intervalo.

### 3.3.2 Simulaciones de la cascada lateral con el coche completo

#### 3.3.2.1 Sensibilidad de la malla

Antes de proceder a las simulaciones de las diferentes configuraciones de la cascada lateral, se comienza por realizar un análisis de la sensibilidad de la malla para el coche completo, al igual que se hizo para las simulaciones de los perfiles. En estas simulaciones, junto con la cascada lateral, se incluirán los siguientes elementos (ver Figura 3.16).

- Main Hoop.
- Bloque motor simplificado.
- Piloto.
- Monocasco.
- Neumáticos simplificados.
- Alerón delantero.
- Alerón trasero.

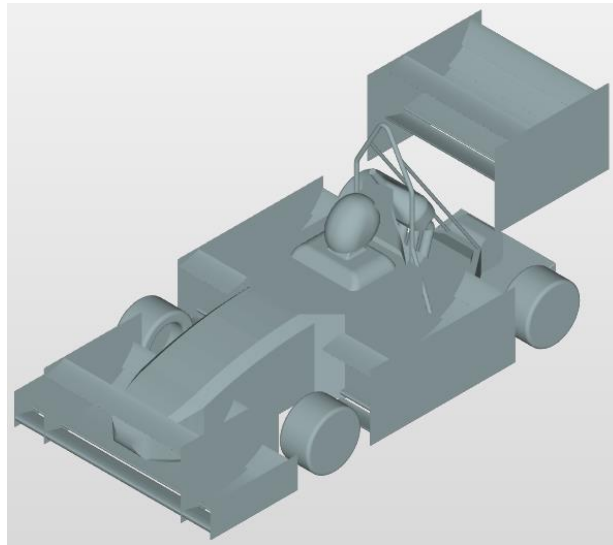


Figura 3.16. Coche sobre el que se realiza el análisis de sensibilidad de malla.

Para el análisis de sensibilidad de malla se empleará una cascada lateral que constará de slat, perfil principal, perfil secundario, perfil terciario y endplate. La malla constará de unas dimensiones de 7 x 7.25 x 28 metros y se simulará con una velocidad de corriente de 60 km/h, velocidad establecida por el Departamento de Aerodinámica de Formula UC3M para las simulaciones aerodinámicas. Indicar que, la malla empleada es una malla que corta al coche por su plano de simetría, hecho que reducirá el coste computacional de mallado y simulación al no tener que crear una malla del doble de tamaño. Señalar también que las dimensiones empleadas en la malla corresponden a una malla lo suficientemente grande como para que sea posible analizar las líneas de corriente del vehículo.

Nótese que la explicación detallada de cómo se ha realizado el mallado del vehículo completo se encuentra en el subapartado 3.2.2. de esta memoria.

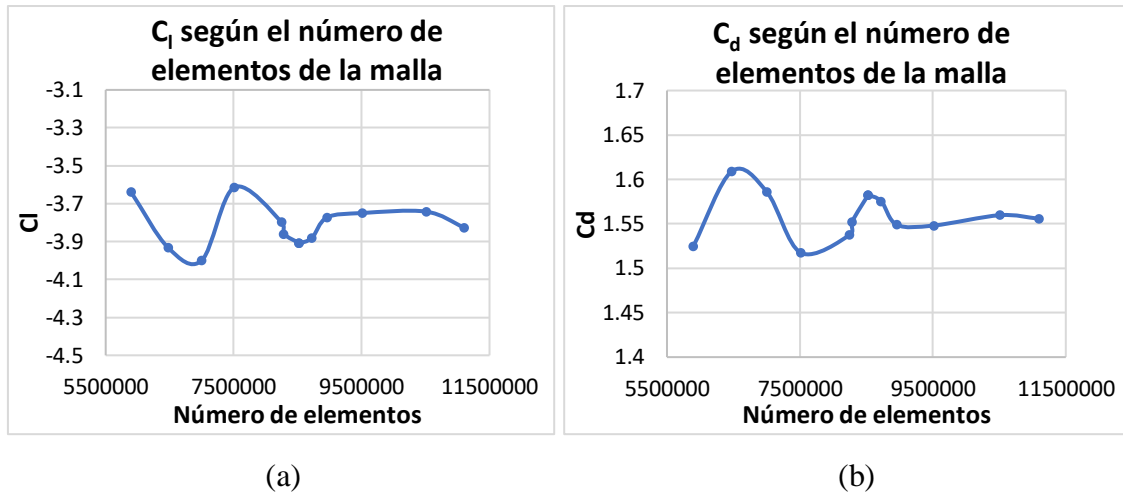


Figura 3.17. Para el coche completo: (a)  $C_l$  según el número de elementos de la malla. (b)  $C_d$  según el número de elementos de la malla.

Se puede observar en la Figura 3.17 cómo la convergencia de los resultados tiende a aparecer para mallas de más de 8 millones de elementos, convergiendo en mallas que superan los 9 millones de elementos, con variaciones del 2% para el caso del coeficiente de sustentación vertical y variaciones del 1% para el coeficiente de resistencia aerodinámica. Por ende, para tener una adecuada precisión junto con el mínimo coste computacional posible, se empleará una malla con las siguientes características:

- **Tamaño de la malla:** 7 x 7.25 x 28 metros.
- **Número de celdas en dirección x:** 25.
- **Número de celdas en dirección y:** 25.
- **Número de celdas en dirección z:** 100.

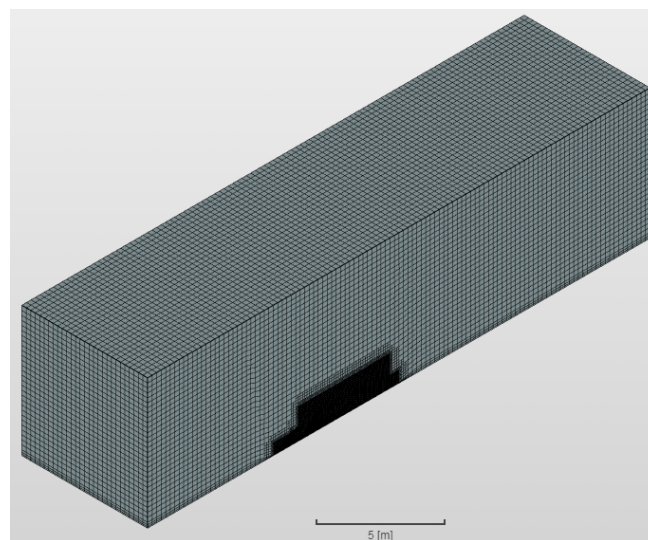


Figura 3.18. Malla definitiva para el coche completo con 9515721 elementos.

### 3.3.2.2 Análisis de los resultados de las simulaciones

Atendiendo a los resultados previamente obtenidos, se procede a simular la cascada lateral, un conjunto de perfiles alares que van anclados a los laterales del vehículo (ver Figura 1.15). La cascada lateral y los elementos que la componen se pueden ver con detalle en la Figura 3.19:

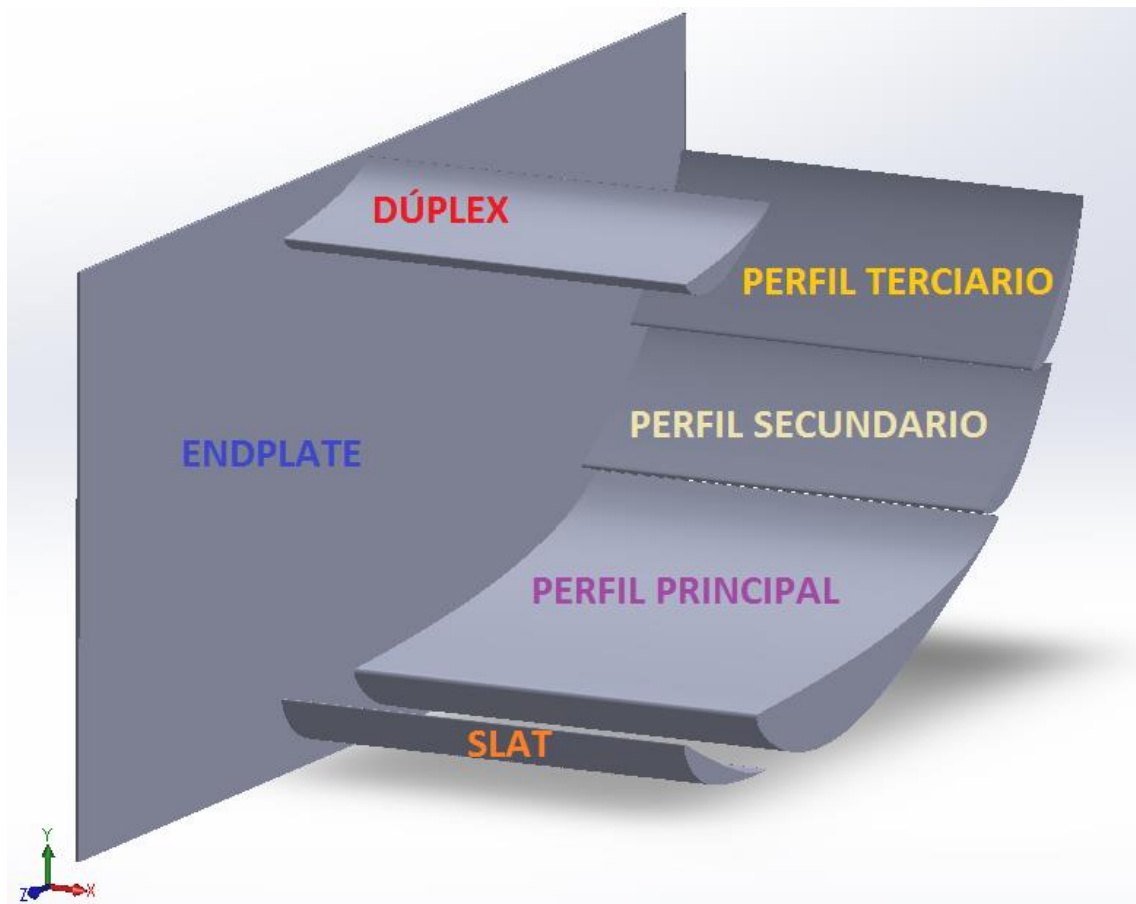


Figura 3.19. Elementos que integran la cascada lateral.

Las cascadas laterales simuladas varían su configuración y su predisposición al modificar ciertos parámetros y perfiles:

- **Inclusión o no inclusión del dúplex:** este perfil se encuentra en la vertical del slat y se trata de un perfil FX74\_CL5\_140 de cuerda 150 mm.
- **Tipo de slat:** el slat, perfil con ángulo de ataque negativo (ver Figura 3.9), se simulará tanto como perfil FX74\_CL5\_140 de cuerda 150 mm, como perfil GOE570 de cuerda 130 mm.
- **Cuerda del perfil principal:** el perfil principal será simulado con diferentes cuerdas (véase Figura 2.2 donde se define el concepto de cuerda): 375 mm, 425 mm y 570 mm. Las cuerdas que se han escogido y la razón por la que se han escogido estas quedó definida en el subapartado 3.1.

- **Ángulo de ataque de los distintos perfiles:** los perfiles alares variarán su ángulo de ataque de una configuración a otra para buscar cuál es el que mejores resultados arroja al conjunto. Los ángulos de ataque estudiados corresponden a los que mejores resultados arrojaron en el estudio de los perfiles por separado (véase subapartado 3.3.1.2. El concepto de ángulo de ataque se observa en la Figura 3.9.
- **Gap y overlap entre los perfiles:** distancia vertical y horizontal entre perfiles respectivamente, tal y como se muestra en la siguiente Figura 3.20:

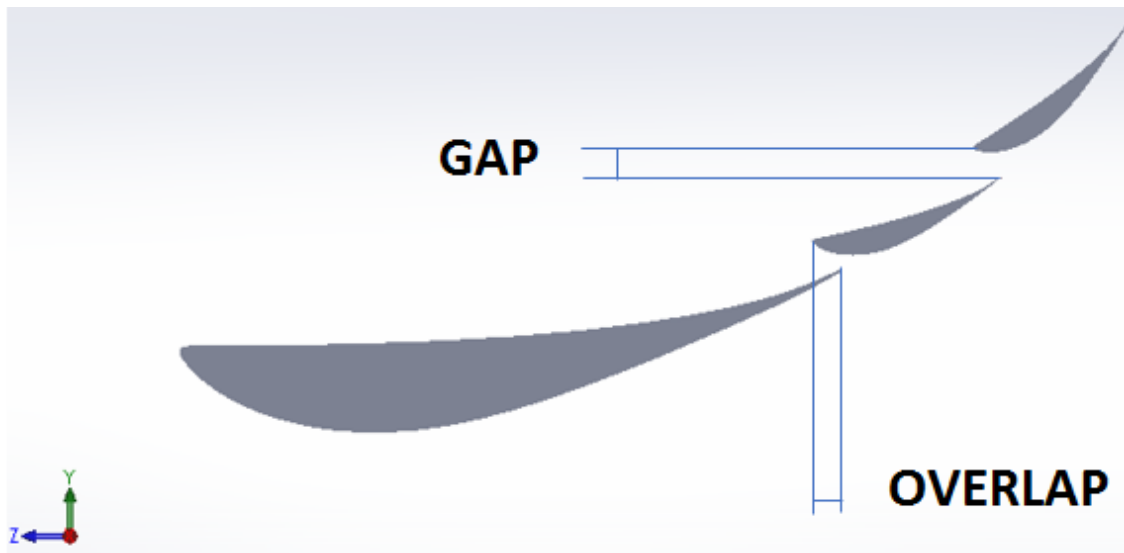


Figura 3.20. Gap y overlap entre perfiles.

En primer lugar, se probarán cascadas laterales con un perfil principal de cuerda 375 mm. A continuación, se mostrarán las configuraciones que han arrojado resultados más significativos. Las demás configuraciones simuladas con esta cuerda en el perfil principal se mostrarán en el anexo.

Tabla 3.4. Configuración de la Cascada 10.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	375	9	50	20
Perfil secundario	150	30	27	15
Perfil terciario	150	45	25	12

Tabla 3.5. Configuración de la Cascada 15.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	130	-14	/	/
Perfil principal	375	10	30	40
Perfil secundario	150	32.5	25	20
Perfil terciario	150	55	22	17

Tabla 3.6. Configuración de la Cascada 17.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	130	-14	/	/
Perfil principal	375	9	32	30
Perfil secundario	150	35	25	20
Perfil terciario	150	60	25	10

Las configuraciones simuladas con un perfil principal de cuerda 375 mm arrojan los resultados que se muestran en la Tabla 3.7:

Tabla 3.7. Resultados de las configuraciones con perfil principal de cuerda 375 mm.

Configuración	Lift (N)	Drag (N)	Lift/Drag
Cascada 1	-43,49	16,58	-2,624
Cascada 2	-53,51	22,98	-2,329
Cascada 3	-49,38	19,24	-2,566
Cascada 4	-51,24	22,26	-2,301
Cascada 5	-45,14	16,84	-2,681
Cascada 6	-47,07	14,83	-3,173
Cascada 7	-51,28	17,38	-2,950
Cascada 8	-57,88	23,69	-2,443
Cascada 9	-47,15	15,29	-3,082
Cascada 10	-52,25	16,31	-3,202
Cascada 11	-50,35	16,89	-2,979
Cascada 12	-53,67	16,83	-3,189
Cascada 13	-54,20	16,93	-3,201
Cascada 14	-54,87	16,22	-3,383
Cascada 15	-55,58	18,20	-3,052
Cascada 16	-52,72	16,06	-3,281
Cascada 17	-55,10	16,36	-3,367



Se corrobora lo que las simulaciones de los perfiles por separado indicaban: el perfil GOE570 funciona mejor que el FX74\_CL5\_140 como slat del conjunto, permitiendo generar más carga aerodinámica al conjunto a la vez que una mejor relación lift/drag. Se seguirá probando el FX74\_CL5\_140 como slat en las cascadas que tengan una mayor cuerda en el perfil principal, aunque se puede intuir que seguirá la misma tendencia que en este caso.

En cuanto al perfil principal, se observa que el mejor comportamiento lo tiene para un ángulo de ataque de  $9^\circ$ , consiguiendo tanto un buen lift, como una buena eficiencia. Se tendrá en cuenta para las siguientes simulaciones, con un perfil de cuerda mayor.

Para los perfiles secundario y terciario, los mejores resultados se obtienen para dos configuraciones:  $32.5^\circ$ - $55^\circ$  y  $35^\circ$ - $60^\circ$ , por lo que se deberán probar estos ángulos de ataque para las configuraciones que se realicen a continuación.

Se procede pues a aumentar la cuerda del perfil principal, empleando una cuerda de 425 mm, buscando mejorar los resultados obtenidos anteriormente. Además, se comenzará a probar el dúplex, un perfil alar situado en la vertical del slat que tiene la función de generar carga aerodinámica aprovechando la escasa influencia que el alerón delantero tiene a esta altura. A continuación, se muestran las configuraciones de la cascada lateral que han arrojado los resultados más significativos; las demás se encuentran en el anexo.

Tabla 3.8. Configuración de la Cascada 37.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	36	27	0
Perfil terciario	150	55	24	0
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 3.9. Configuración de la Cascada 40.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	36	27	0
Perfil terciario	150	55	35	12
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 3.10. Configuración de la Cascada 46.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	150	-14	/	/
Perfil principal	425	8	32	45
Perfil secundario	150	35	22	20
Perfil terciario	150	60	20	8
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 3.11. Configuración de la Cascada 47.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	150	-14	/	/
Perfil principal	425	8	32	45
Perfil secundario	150	40	20	15
Perfil terciario	150	65	25	12
Dúplex	150	15	/	/

Las configuraciones simuladas con un perfil principal de 425 mm arrojan los resultados que se plasman a continuación:

Tabla 3.12. Resultados de las configuraciones con perfil principal de cuerda 425 mm.

Configuración	Lift (N)	Drag (N)	Lift/Drag
Cascada 18	-60,01	22,05	-2,721
Cascada 19	-58,06	22,71	-2,556
Cascada 20	-60,55	22,67	-2,671
Cascada 21	-65,76	25,60	-2,568
Cascada 22	-63,61	24,14	-2,635
Cascada 23	-59,88	24,37	-2,456
Cascada 24	-59,70	22,53	-2,650
Cascada 25	-54,30	16,37	-3,316
Cascada 26	-49,66	16,18	-3,070
Cascada 27	-52,25	16,32	-3,202
Cascada 28	-68,36	21,97	-3,112
Cascada 29	-64,19	20,82	-3,083
Cascada 30	-62,28	21,37	-2,913
Cascada 31	-59,74	19,65	-3,040
Cascada 32	-60,88	20,36	-2,990
Cascada 33	-60,70	20,90	-2,903
Cascada 34	-69,01	22,31	-3,093
Cascada 35	-68,81	22,01	-3,126

Tabla 3.13. Resultados de las configuraciones con perfil principal de cuerda 425 mm.

Configuración	Lift (N)	Drag (N)	Lift/Drag
Cascada 36	-70,20	24,74	-2,837
Cascada 37	-70,65	22,95	-3,078
Cascada 38	-68,41	22,77	-3,003
Cascada 39	-68,23	23,64	-2,885
Cascada 40	-69,30	21,47	-3,227
Cascada 41	-69,94	23,52	-2,973
Cascada 42	-70,41	22,95	-3,068
Cascada 43	-70,30	23,35	-3,011
Cascada 44	-71,61	23,20	-3,086
Cascada 45	-70,41	22,71	-3,099
Cascada 46	-72,52	22,67	-3,198
Cascada 47	-72,81	23,79	-3,060

En algunas de estas configuraciones se ha estudiado la influencia del dúplex. Este elemento, colocado en la vertical del slat, a ras del plano superior del monocasco, genera una carga aerodinámica extra, de alrededor de 6 a 7 N. Sin embargo, se la considera demasiado escasa como para considerar la instalación de este perfil. Existe una norma en la competición Formula Student por la que el piloto debe de ser capaz de salir del vehículo en un tiempo inferior a los 5 segundos; la instalación de este perfil obstaculizaría al piloto en caso de emergencia, además de poder romper el perfil con su propio peso si saltara por error encima de este perfil. Debido al escaso beneficio que el dúplex aporta y el riesgo que conlleva su instalación, además del coste de fabricación de este, se decide por descartar su uso.

En cuanto al slat, las configuraciones en las que se emplea el perfil GOE570 poseen unos mejores resultados en cuanto a carga generada y eficiencia que en los que se emplea el perfil FX74\_CL5\_140. Además, el empleo del perfil GOE570 permite emplear un perfil principal de menor ángulo de ataque, lo que se traduce en una menor resistencia aerodinámica y, por ende, mayor eficiencia del conjunto. Por ende, se descarta definitivamente el uso del perfil FX74\_CL5\_140 de cuerda 150 mm como slat del conjunto.

De las configuraciones con el perfil GOE570 empleado como slat, se desprende que el ángulo idóneo para el perfil principal de cuerda 425 mm es de 8°. Además, es reseñable en comparación con las configuraciones en las que se empleaba un perfil de cuerda 375 mm, que a medida que se aumenta la cuerda del perfil principal, el ángulo de ataque óptimo decrece con dicho aumento. Como nota negativa, la eficiencia del conjunto en estas configuraciones disminuye ligeramente, algo que se compensa con una mayor generación de carga aerodinámica (en torno al 30%).

También se debe indicar que este perfil de cuerda mayor permite que los perfiles secundario y terciario adquieran un mayor ángulo de ataque, lo que les permite generar una mayor carga aerodinámica. Estos perfiles obtienen buenos resultados en disposición 35°-60° y 40°-65°.

Señalar que todas las simulaciones anteriores se realizaron con el monocasco del año 2017. Es a partir de ahora cuando se entrega por parte del departamento de chasis el monocasco definitivo que usará el equipo en la temporada 2018. Este monocasco permite reducir peso y bajar el centro de gravedad respecto al año anterior, sin embargo, como veremos a continuación empeora el funcionamiento del paquete aerodinámico en torno al 30 %. Por esta razón, se aumentó al máximo la cuerda del perfil principal, hasta 570 mm, resultando las siguientes configuraciones y resultados:

Tabla 3.14. Configuración de la Cascada 48.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	130	-14	/	/
Perfil principal	570	7	40	35
Perfil secundario	150	35	22	20
Perfil terciario	150	60	20	15

Tabla 3.15. Configuración de la Cascada 49.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	130	-14	/	/
Perfil principal	570	8	35	35
Perfil secundario	150	35	22	20
Perfil terciario	150	60	20	15

Tabla 3.16. Configuración de la Cascada 50.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	130	-14	/	/
Perfil principal	570	8	35	35
Perfil secundario	150	40	20	20
Perfil terciario	150	65	20	12

Tabla 3.17. Configuración de la Cascada 51.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	130	-12	/	/
Perfil principal	570	7	40	38
Perfil secundario	150	40	27	25
Perfil terciario	150	65	22	17

Tabla 3.18. Configuración de la Cascada 52.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	130	-10	/	/
Perfil principal	570	7	35	42
Perfil secundario	150	40	27	25
Perfil terciario	150	65	22	17

Tabla 3.19. Configuración de la Cascada 53.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	130	-11	/	/
Perfil principal	570	7	35	45
Perfil secundario	150	40	27	25
Perfil terciario	150	65	22	17

Las anteriores configuraciones generan los resultados que se plasman en la Tabla 3.20:

Tabla 3.20. Resultados de las configuraciones con perfil principal de cuerda 570 mm.

Configuración	Lift (N)	Drag (N)	Lift/Drag
Cascada 48	-57,20	28,20	-2,028
Cascada 49	-57,20	27,94	-2,047
Cascada 50	-57,50	28,50	-2,017
Cascada 51	-56,96	27,30	-2,086
Cascada 52	-56,87	27,26	-2,086
Cascada 53	-57,53	27,465	-2,094

La Cascada 53 es la que mejores resultados arroja con el nuevo monocasco y será la configuración de la cascada lateral que se empleará en el coche. Arroja la mayor cara aerodinámica entre todas las configuraciones simuladas con perfil principal de 570 mm y, además, la mejor eficiencia aerodinámica.

Se calcula por último la carga y resistencia aerodinámica que genera cada elemento de la cascada que se empleará en el coche. Los resultados se plasman en la Tabla 3.21:

Tabla 3.21. Fuerzas generadas por los distintos elementos aerodinámicos de la cascada lateral.

Elemento	Lift (N)	Drag (N)	Lift/Drag
Slat	-0,671	-1,062	-0,6312
Perfil principal	-45,12	-9,527	-4,736
Perfil secundario	-4,636	8,653	-0,5357
Perfil terciario	-2,219	7,990	-0,2777
Endplate	-0,7315	0,233	-3,138

Se pueden comprobar cómo se verifican los resultados que se obtuvieron en el análisis de los perfiles por separado. El slat que mejor ha funcionado ha sido el que tenía un ángulo de ataque de  $-11^\circ$ , muy cerca de los  $12^\circ$  que fue el que mejores resultados obtuvo en las simulaciones (ver Figura 3.11).

El perfil principal tiene mayor eficiencia aerodinámica y genera más carga que cuando se simuló por separado, lo cual verifica el buen funcionamiento del slat en el conjunto.

Sin embargo, los perfiles secundario y terciario empeoran los resultados al integrarlos en el coche al compararlo con los resultados obtenidos cuando se simularon en solitario (ver Figura 3.12), hecho esperado dado que se ven muy influenciados por los distintos elementos aerodinámicos que los preceden y de la rotación de las ruedas delanteras. Sin embargo, cumplen su función de retirar la mayor cantidad de corriente incidente sobre las ruedas traseras.

## 4 Análisis de la vorticidad del vehículo

En este apartado se analizará la vorticidad que genera el vehículo por la acción de los elementos aerodinámicos de la cascada lateral. La vorticidad es una magnitud física que mide la rotación local de un fluido. Controlar los vórtices que los distintos elementos del vehículo generan, permiten redirigir el aire hacia diferentes zonas de interés, reducir o eliminar la turbulencia que ciertos elementos generan o disminuir la resistencia aerodinámica que ciertos elementos del coche generan [12]. Uno de los objetivos principales del diseño de la cascada lateral era reducir la turbulencia generada por las ruedas traseras, por lo que para verificar esta reducción es esencial realizar un análisis de la vorticidad generada. Para tal fin, se realizarán secciones dentro del volumen de control para estudiar cómo cada uno de los diferentes perfiles que componen la cascada generan vorticidad a su paso.

Para este estudio se emplea el software *Paraview 4.3.1*, un programa de post procesado que permite estudiar los resultados que arroja *Simscale*. Aunque *Simscale* también tiene la capacidad de analizar los resultados, al ser un programa en la nube en su vertiente gratuita, es mucho más lento que *Paraview 4.3.1*, ya que este último analiza todos los resultados de manera local, empleando la computadora del usuario para el análisis de los datos de las simulaciones.

En primer lugar, será analizada la acción de cada uno de los perfiles de la cascada a tres velocidades diferentes: 40, 60 y 80 km/h. Para ello se estudiarán imágenes de 3 en 3, graduadas con la misma escala y enfocando hacia la misma zona de la cascada, para así observar la variación de la vorticidad según la velocidad en la región de estudio.

Señalar que en la Figura 3.19 se indica el nombre de todos y cada uno de los elementos de la cascada que se estudiarán a continuación.

Justo antes de llegar a la cascada lateral, la vorticidad es la siguiente:

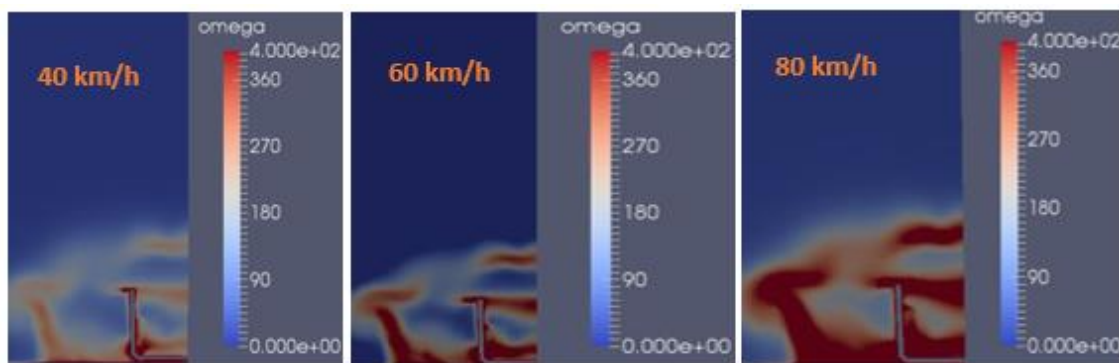


Figura 4.1. Vorticidad justo antes de la cascada lateral.

Se observa que a medida que se aumenta la velocidad, la vorticidad aumenta con ella. Además, se puede contemplar una zona de alta vorticidad generada a consecuencia de la rotación de las ruedas delanteras. También se hace notar una alta vorticidad en la zona cercana al suelo debida a la acción del alerón delantero, así como en la zona cercana a las zonas más afiladas del monocasco.



Avanzando hacia el primer perfil aerodinámico, el slat, la vorticidad resulta ser:

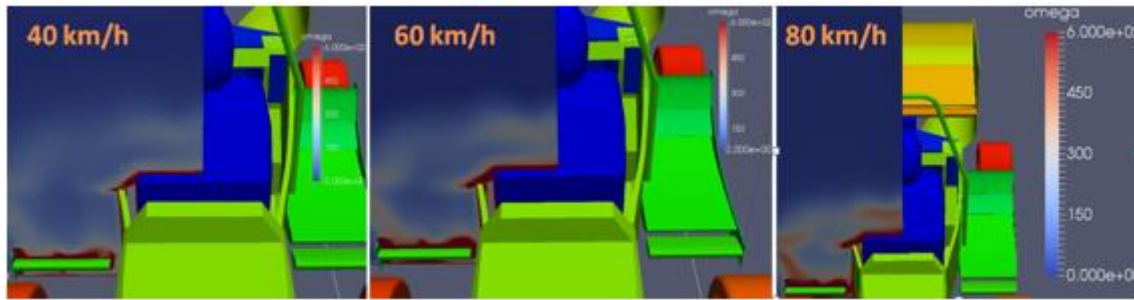


Figura 4.2. Vorticidad en el slat.

Se observa que las zonas en las que el slat provoca mayor vorticidad son las regiones cercanas al endplate y al monocasco, entendiéndose que los bordes de los distintos elementos aerodinámicos son los responsables de la generación de vórtices. Así mismo se corrobora que la generación de vórtices sigue aumentando con la velocidad.

Por último, señalar que el borde del monocasco genera en su parte superior vórtices que podrían afectar al funcionamiento de los últimos perfiles de la cascada; se intuye que la vorticidad es mayor en la zona superior que en la inferior del monocasco debido a que en esta zona el alerón delantero no ha afectado al aire de manera tan acusada como en la región más cercana al suelo, entrando más aire limpio y a mayor velocidad que en la zona inferior.

Debido a la cuerda que tiene el perfil principal, se procede a estudiar la vorticidad generada tanto en la parte delantera del perfil como en la parte trasera del mismo. Así pues, en el inicio se tiene que:

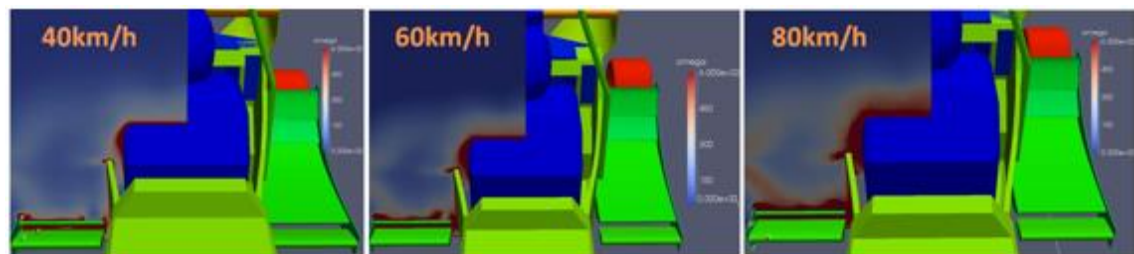


Figura 4.3. Vorticidad en la parte delantera del perfil principal.

En este caso se puede contemplar lo observado en el caso anterior: los bordes de los distintos elementos aerodinámicos son los principales generadores de vórtices. Nótese que entre la zona central del perfil principal y la más cercana al monocasco, aparece un repunte de la vorticidad, causado principalmente por la diferencia del aire que le entra al perfil en esta región; mientras que la parte exterior está influenciada por el conjunto del alerón delantero con los neumáticos, la zona interior está condicionada por el alerón delantero y, en menor grado, por la acción de las ruedas.

Señalar por último lo visto en el caso anterior: la zona superior del monocasco sigue generando vórtices en el lateral de este, siendo más acusada su generación en la parte superior del mismo.



Dado que en la anterior figura no se observa con claridad lo que ocurre en la zona por debajo del perfil principal, se procede a realizar una sección quitando el coche para mejorar la visualización.

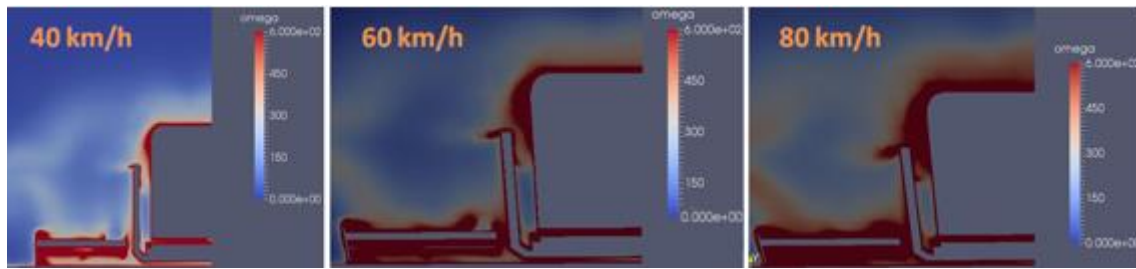


Figura 4.4. Vorticidad en la parte delantera del perfil principal sin coche.

En esta figura se aprecia una gran generación de vórtices en los extremos del main, tanto por la parte superior del perfil como por la inferior. Además, se puede apreciar que el repunte anteriormente comentado de la vorticidad en la parte superior del perfil, también se da en su parte inferior, ocurriendo ahora en una parte más centrada del perfil principal.

Comentar también que la región que está en contacto con el suelo presenta una elevada vorticidad, la cual se propaga desde el centro del vehículo hasta la zona exterior de la cascada donde no hay ningún elemento aerodinámico.

Avanzando hacia el final del perfil principal, se tiene que:

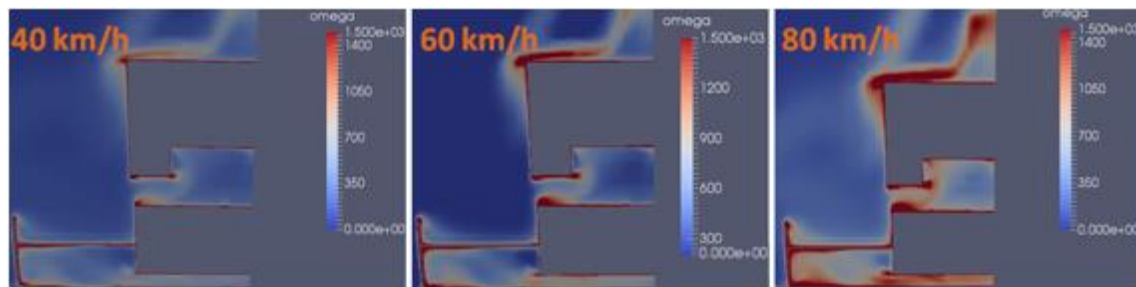


Figura 4.5. Vorticidad en la parte trasera del perfil principal.

En esta figura se puede apreciar con gran claridad el efecto que tienen las esquinas de los diferentes componentes del coche sobre la vorticidad, siendo éstas las principales responsables de la generación de vórtices. Además, se sigue observando que el rozamiento del aire que pasa por debajo del coche con el suelo provoca la aparición de vórtices, propagándose ligeramente esta región de alta vorticidad hacia el exterior de la cascada lateral.

Para el perfil secundario de la cascada, se observa lo siguiente:

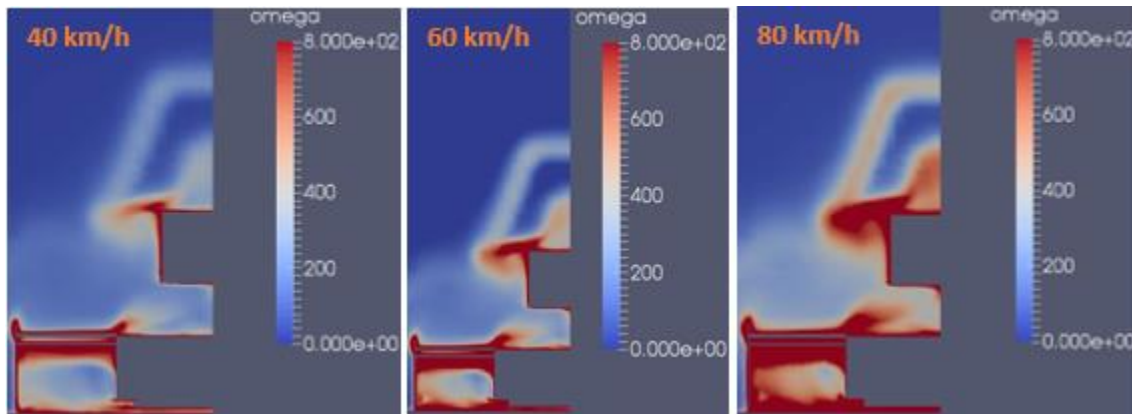


Figura 4.6. Vorticidad en el perfil secundario.

La generación de vórtices ocasionada por el paso de los perfiles secundario y terciario es más constante y lineal a lo largo del perfil que para el perfil principal o el slat. Asimismo, se sigue observando que el endplate, especialmente en su parte superior, y el borde del monocasco siguen siendo zonas de elevada vorticidad.

Por último, para la zona final de la cascada lateral, la vorticidad es la siguiente:

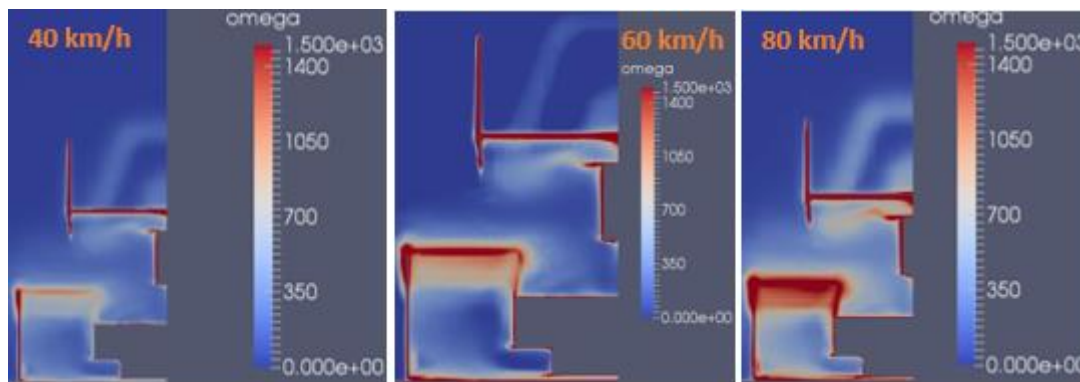


Figura 4.7. Vorticidad al final de la cascada lateral.

Para esta zona, la influencia de la vorticidad de los 3 primeros perfiles es residual, siendo el perfil terciario el único que posee cierta influencia en la aparición de vórtices. Al igual que se ha visto en todo este apartado, el endplate en su parte superior sigue siendo el máximo responsable de la aparición de vórtices a consecuencia de la cascada lateral.

De este estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- A medida que se aumenta la velocidad, la vorticidad aumenta en consecuencia.
- Los elementos que presentan zonas afiladas acabadas en punta o pico, tales como endplate o monocasco, son los principales causantes de la vorticidad en la cascada lateral.
- El espacio comprendido entre el suelo y la parte inferior del monocasco y la cascada lateral es una región de elevada vorticidad.
- El efecto de los neumáticos delanteros y el perfil terciario del alerón delantero, el cual no llega hasta el endplate, provoca que la vorticidad generada por el slat y el perfil principal no sea constante a lo largo del perfil.



Para reducir la vorticidad que genera la cascada lateral se analizaron diversas opciones que fueron rechazadas por diversas razones que se exponen a continuación:

- Instalación de unos cubrerruedas delanteros. Su instalación no está permitida para la competición Formula Student (véase norma T.1.1.3 en el subapartado 1.2 de esta memoria).
- Instalación de una cascada lateral más ancha. No es posible dado que los elementos aerodinámicos no deben sobresalir por normativa a un plano imaginario formado por los flancos de las ruedas (véase norma T.7.3.2 en el subapartado 1.2 de esta memoria).

## 5 Análisis de las líneas de corriente

### 5.1 Análisis de las líneas de corriente interactuando con la cascada lateral

Para este análisis se empleará el mismo software que se usó para el análisis de la vorticidad generada por la cascada lateral, *Paraview 4.3.1*, que permite analizar el movimiento de las partículas fluidas cuando interactúan con el vehículo. Con este estudio se desea observar cómo el aire interactúa con los distintos elementos que componen la cascada lateral, así como la influencia sobre la cascada de los elementos que la preceden: alerón delantero y ruedas delanteras.

Con el coche circulando a una velocidad de 60 km/h (velocidad establecida por el Departamento de Aerodinámica de Formula UC3M para las simulaciones) y con 200 líneas de corriente se tiene:

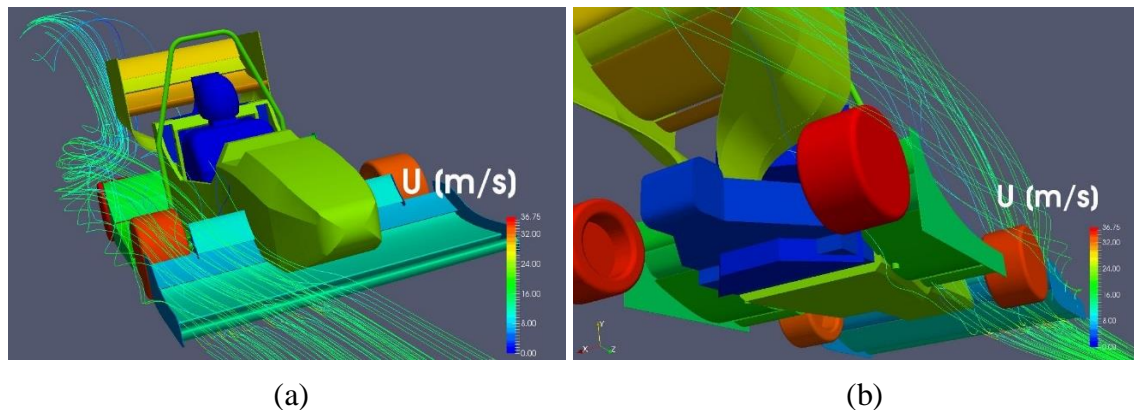


Figura 5.1. (a) Coche con 200 líneas de corriente circulando a 60 km/h (vista frontal-superior) (b) Coche con 200 líneas de corriente circulando a 60 km/h (vista trasera-inferior).

En primer lugar, se puede observar en la Figura 5.1 (a) que la interacción del fluido con el ala y ruedas delanteras hace que éste se desvíe en gran medida de su trayectoria original y no entre en contacto en gran medida con la cascada lateral. Además, se contempla como ciertas líneas de corriente se escapan por el endplate del alerón delantero y, debido a la rotación con las ruedas delanteras, estas líneas sufren la acción de remolinos, entrando finalmente en contacto con los perfiles de la cascada lateral a una velocidad muy inferior a la de circulación del vehículo, lo cual no favorece un buen funcionamiento de la cascada lateral.

También se puede observar en esta figura cómo la rotación de las ruedas traseras genera torbellinos a su paso, los cuales reducen la velocidad de circulación de las partículas fluidas, haciendo que estas generen una gran cantidad de resistencia aerodinámica y empeorando el funcionamiento dinámico del monoplace.

En la Figura 5.1 (b) se contempla la existencia de líneas de corriente que bordean al flanco del neumático trasero, lo cual es un hecho positivo ya que el aire pasa cerca de las ruedas sin desviarse.

Para observar en más detalle la interacción de la cascada lateral con el aire, se analiza el coche a la misma velocidad, 60 km/h, con 500 y 1000 líneas de corriente:

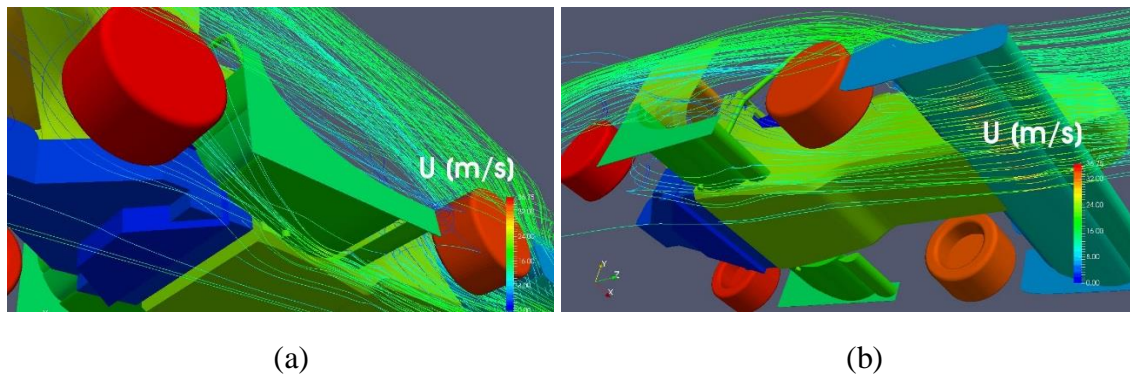


Figura 5.2. (a) Coche con 1000 líneas de corriente circulando a 60 km/h (vista lateral-inferior). (b) Coche con 500 líneas de corriente circulando a 60 km/h (vista inferior).

En la Figura 5.2 (a) se observa que detrás de la rueda delantera existe un torbellino que reduce drásticamente la velocidad del fluido en ese punto y que afectará negativamente al comportamiento aerodinámico del vehículo. También se puede ver cómo las líneas de corriente siguen la forma de los perfiles aerodinámicos por la parte inferior, quitando una gran cantidad de aire a las ruedas traseras.

En la Figura 5.2 (b) se contempla la existencia de torbellinos generados por las ruedas delanteras, así como un correcto redireccionamiento del flujo hacia los distintos perfiles de la cascada.

Además, en la Figura 5.2 (a) se vuelve a observar lo visto en la Figura 5.1 (b): líneas corriente que bordean al flanco del neumático trasero. Por ende, se estudia a continuación la inclusión de un gurney flap en el endplate para redireccionar el flujo por el exterior del neumático trasero.

Por último, se analiza el empleo del gurney flap endplate. Este dispositivo aerodinámico es un apéndice que se estudia montar en el exterior del endplate sobresaliendo de este y formando 90° con el mismo. Con el empleo de este dispositivo, se busca lograr que el aire bordee de una manera más eficaz a las ruedas traseras, con la consecuente disminución de turbulencia y resistencia aerodinámica que ello conllevaría.



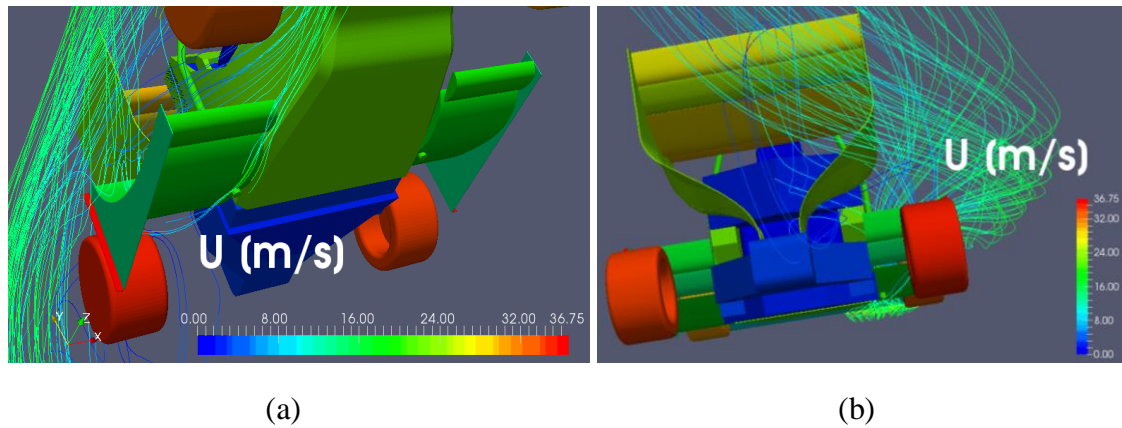


Figura 5.3. (a) Coche con gurney flap con 500 líneas de corriente circulando a 60 km/h (vista frontal-inferior). (b) Coche con gurney flap con 500 líneas de corriente circulando a 60 km/h (vista trasera).

Se observa claramente cómo el empleo del gurney flap en el extremo del endplate permite redireccionar la corriente hacia el exterior del neumático, evitando que la corriente entre en contacto con un neumático en rotación y evitando el aumento de la resistencia aerodinámica, por lo que se optó por incluir este gurney flap en la cascada lateral, aunque como se indicará en el apartado 6 de este documento, no llegó a fabricarse.

## 5.2 Efecto del alerón de entrada (slat) en las líneas de corriente

En las simulaciones realizadas se llegó a la conclusión de que el empleo del slat proporcionaba una gran mejora en la capacidad de la cascada lateral de generar carga aerodinámica. Teóricamente, el slat al ir delante del perfil principal ayuda a retrasar el desprendimiento de la capa límite y permite maximizar la carga aerodinámica que generan los perfiles que le siguen.

A continuación, se realiza una comparativa de cómo las líneas de corriente se comportan en una cascada lateral que posee slat y en otra que no lo tiene, con el fin de determinar si el slat está actuando adecuadamente.

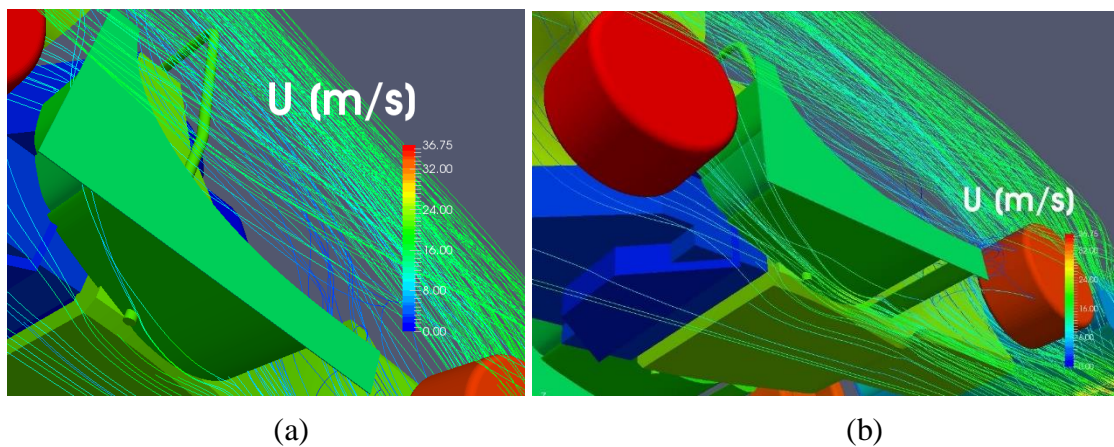


Figura 5.4. (a) Cascada lateral sin slat con 1000 líneas de corriente a 60 km/h (vista lateral-inferior). (b) Cascada lateral con slat con 1000 líneas de corriente a 60 km/h (vista lateral-inferior).

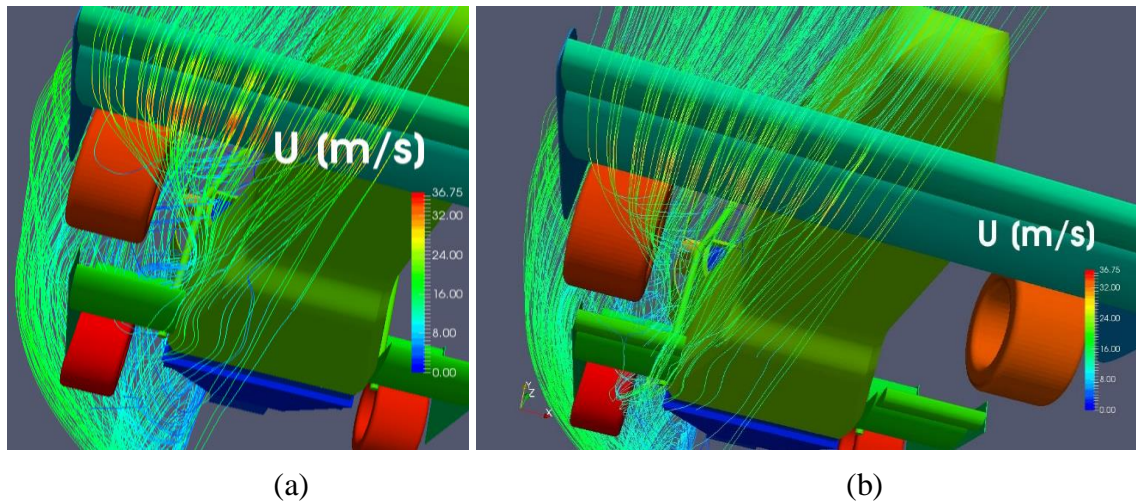


Figura 5.5. (a) Cascada lateral sin slat con 1000 líneas de corriente a 60 km/h (vista frontal inferior). (b) Cascada lateral con slat con 1000 líneas de corriente a 60 km/h (vista frontal-inferior).

Se puede observar cómo el slat redirecciona la corriente y permite que más líneas de corriente lleguen a los perfiles de la cascada, permitiendo que estos trabajen de manera más eficiente y mejorando así la sustentación.

Además, en la cascada sin slat, se puede observar cómo las líneas de corriente se van separando progresivamente de los diferentes perfiles aerodinámicos, a diferencia de la cascada con slat, en la que la corriente sigue la curvatura del perfil.

Por ende, se llega a la conclusión de que el empleo del slat afecta de una manera muy positiva al funcionamiento del conjunto, corroborando los datos de mayor eficiencia aerodinámica que arrojaron las simulaciones de carga y resistencia aerodinámica.



## 6 Fabricación

Para la fabricación de los perfiles de la cascada y los endplates se comienza por realizar un pedido a la empresa de corte por agua, Lasertek, de las diferentes costillas de los perfiles alares, así como los endplates por completo. Ambos elementos están fabricados en aleación de aluminio endurecido 6061-T6, el cual se ha escogido para soportar las fuerzas a las que se verá sometida la cascada en la revisión de los jueces, ya que este aluminio tiene tanto una buena resistencia mecánica como una buena resistencia a la deformación. Nótese que a las costillas se les han practicado una serie de vaciados para reducir su peso total. A continuación, se muestran las costillas y el endplate exterior tras su recepción en el taller.



*Figura 6.1. Costillas de la cascada lateral.*

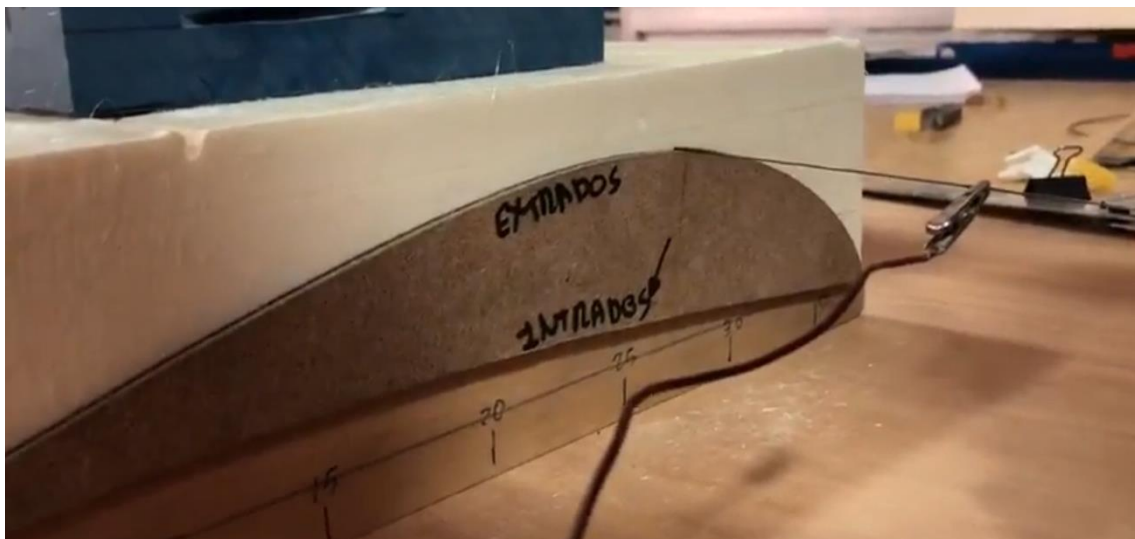


*Figura 6.2. Endplate exterior de la cascada lateral.*

Tras su recepción en el taller, se usan las costillas para crear una plantilla en madera de la forma de los perfiles alares. Estas plantillas servirán de guía para cortar los diferentes perfiles de la cascada lateral con la sierra de hilo caliente.

Los perfiles alares tienen un núcleo de poliestireno extruido, material que destaca por tener una buena resistencia mecánica y que reforzará a los perfiles laminados en fibra de carbono. Este material se vende en planchas de un grosor inferior al necesario, las compradas tienen un espesor de 40 mm, por lo que es necesario pegar las planchas entre sí con adhesivo para poder crear los perfiles deseados.

Una vez ha finalizado el secado de las planchas pegadas, con la ayuda de la guía de madera antes creada se procede a cortar los perfiles con la sierra de hilo caliente. Este proceso se debe realizar con 3 personas para que los perfiles sean fabricados correctamente, 2 personas que sujeten la sierra por cada extremo para que el corte se realice simétricamente y 1 persona portando la sierra de hilo caliente y realizando el corte. En la Figura 6.3 se puede observar cómo la sierra de hilo caliente corta el poliestireno extruido con la ayuda de la plantilla de madera.



*Figura 6.3. Sierra de hilo caliente cortando el poliestireno extruido del perfil principal.*

Una vez cortados los perfiles alares se lijan con una lija de grano fino de 500 y quitar las asperezas y filamentos de la superficie que se han producido al cortar el poliestireno a elevada temperatura (ver Figura 6.4). También se lija el borde de ataque y de salida, que son los que peor acabado tienen como resultado de ser la zona por la que penetra el hilo.



*Figura 6.4. Diferencias entre zona lijada y no lijada en el poliestireno.*

Finalizado este proceso de lijado, se aplica un tapagrietas ligero para rellenar las pequeñas imperfecciones y líneas que deja el paso del hilo caliente. Esto facilitará el proceso de laminado en fibra de carbono al dejar una superficie más lisa.

El perfil principal de la cascada debe adaptar su forma a la del monocasco, por lo que, con la misma sierra de hilo caliente, se corta su forma a la medida del monocasco.

Por último, se pegan con adhesivo las costillas a los diferentes perfiles y se deja secar una hora. En la Figura 6.5 se puede observar el slat de la cascada lateral listo para ser laminado en fibra de carbono.



*Figura 6.5. Slat tras el proceso de lijado, enmasillado y pegado de las costillas.*



Una vez se tienen todos los perfiles, estos son laminados en fibra de carbono de manera manual. Estas láminas de fibra de carbono se extienden sobre las superficies de los endplates y de los perfiles de la cascada lateral en diferentes capas y mediante el empleo de resina epoxi, se adhieren a los contornos de las piezas y entre sí. Es muy importante que no queden burbujas entre las capas y que las superficies tengan una forma uniforme y sin arrugas. Indicar que los endplates llevan dos capas de fibra de carbono por cada cara, con una dirección del laminado de  $0^{\circ}/90^{\circ}$ . Por su parte los perfiles llevan cuatro capas de fibra de carbono en direcciones  $0^{\circ}, 90^{\circ}, -45^{\circ}, 45^{\circ}$ .

Una vez se han curado a temperatura ambiente durante un día todos los perfiles, se envían al patrocinador del equipo FIDAMC los perfiles para ser recanteados y así tener un excelente acabado en los mismos en los bordes de ataque y salida, tal y como se puede observar en la Figura 6.6:



*Figura 6.6. Perfiles de la cascada lateral y alerón delantero recanteados.*

Por último, son colocados los diferentes vinilos de los patrocinadores y de la decoración del monoplaza y se atornillan los perfiles a los endplates y este conjunto al monocasco del coche. El proceso de atornillado puede observarse en el explosionado de la Figura 6.7 (nótese que en esta figura no se han insertado los núcleos de poliestireno extruido debido a que no se han diseñado en *Solidworks 2016* dado que estos se hicieron a medida), mientras que el resultado final se muestra en la Figura 6.8:

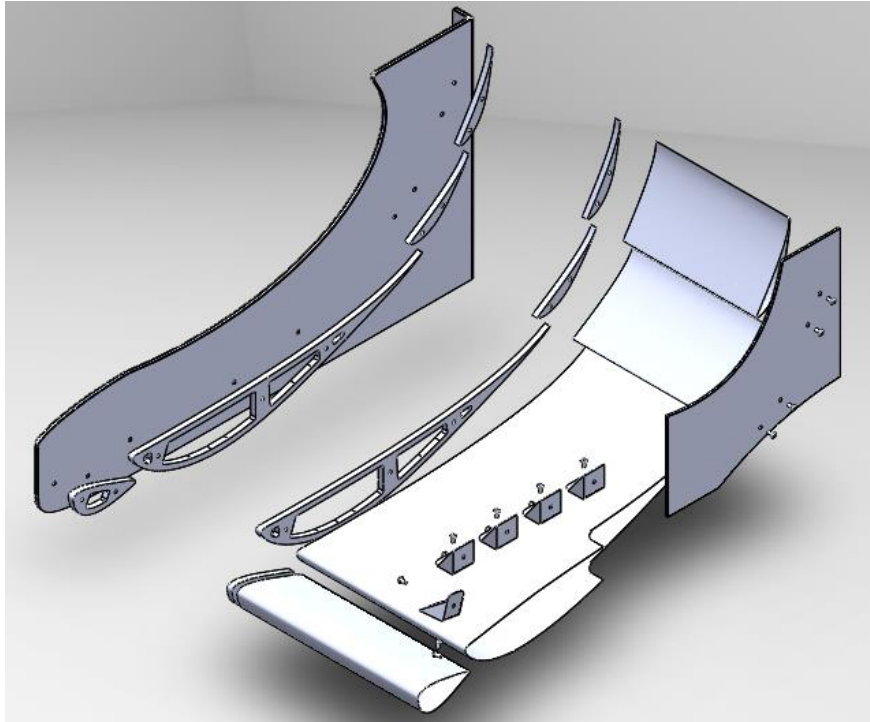


Figura 6.7. Explosionado tridimensional de la cascada lateral.



Figura 6.8. C3-R18 en la competición Formula Student Spain.

## 7 Planificación

La realización de este proyecto ha podido ser llevada a cabo gracias al escrupuloso plan de trabajo que se trazó en diciembre. Este plan de trabajo engloba un periodo de trabajo que oscila entre el mes de diciembre del año 2017 hasta mediados del mes de septiembre del año 2018 que engloba desde el estudio inicial del estado del arte hasta el montaje de la cascada lateral en el vehículo. Señalar que la planificación establecida fue muy flexible para adaptarse a los imprevistos que pudieran seguir. Añadir también que se dejó libre el mes de enero de 2018 por ser las fechas coincidentes con los exámenes del primer cuatrimestre de la universidad.

Los días invertidos en cada proceso, incluidos los días empleados a la redacción de este proyecto, se muestran en el siguiente diagrama de Gantt, una herramienta gráfica en la que se exponen el tiempo dedicado a la realización de los diferentes procesos que engloba un proyecto:

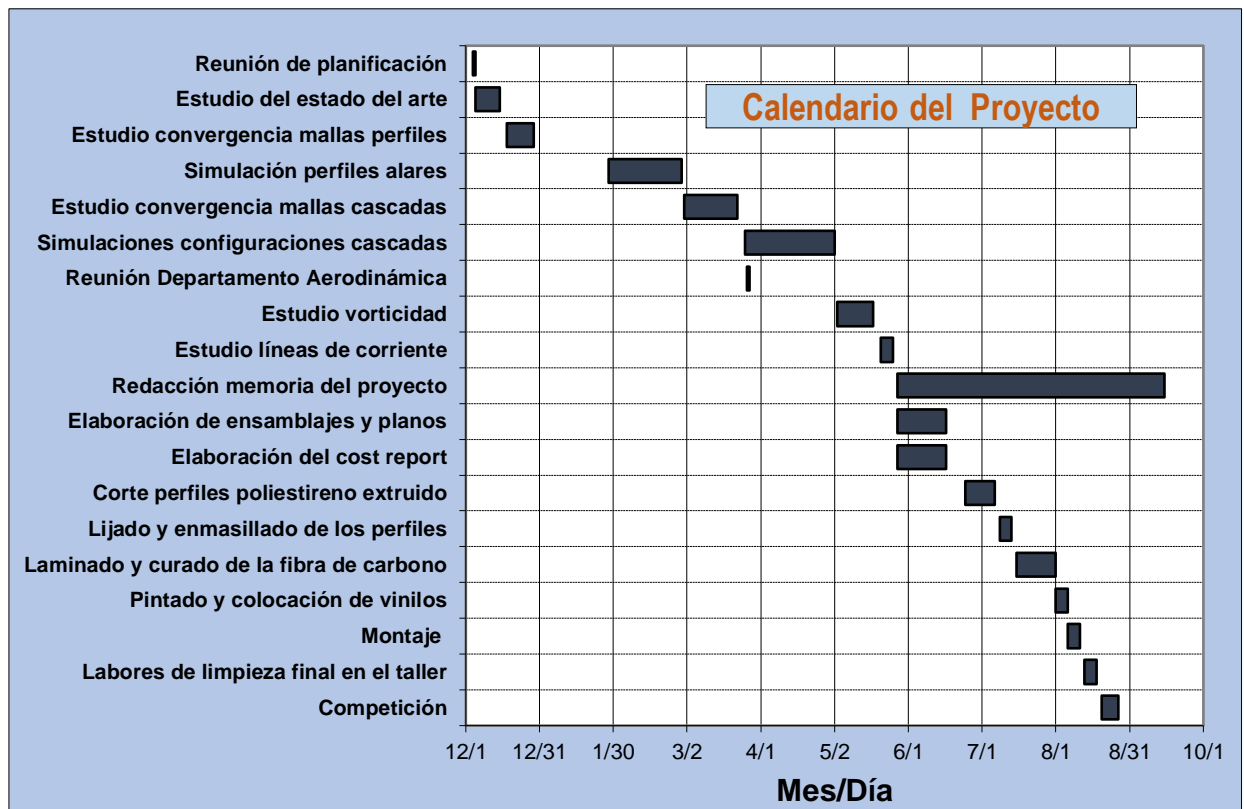


Figura 7.1. Diagrama de Gantt del proyecto.

## 8 Presupuesto

Para la realización de este presupuesto se van a contabilizar las horas dedicadas tanto al diseño como a la fabricación que se han empleado para crear la cascada lateral. El calendario que se ha seguido se muestra en la Figura 8.1:

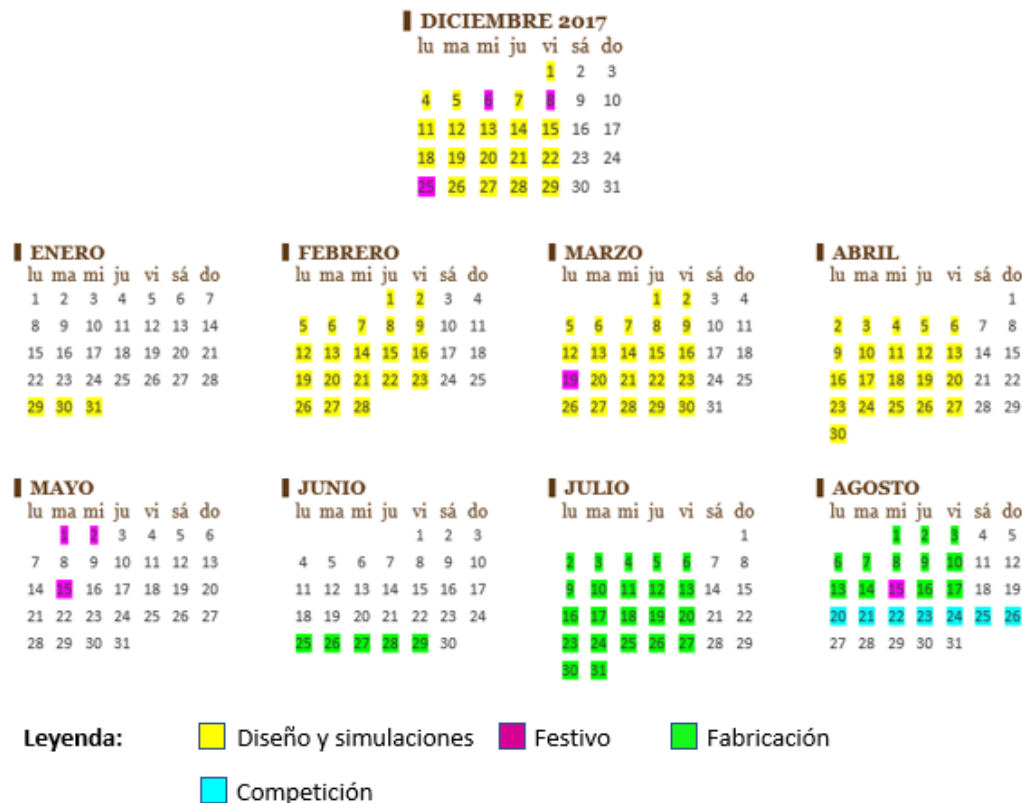


Figura 8.1. Calendario seguido para el diseño y fabricación de la cascada lateral.

Nótese que en este calendario existen dos épocas en las que no se indica ningún tipo de trabajo. En las 4 primeras semanas de enero, se pararon las simulaciones a causa de los exámenes finales del primer cuatrimestre de la universidad. En cuanto al mes de mayo y junio, fue un espacio de tiempo donde la cascada lateral ya estaba diseñada, pero en el que no se pudo empezar a fabricar dado que aún no se disponía de la nave de la universidad debido a que el curso universitario no había concluido. Indicar también que se ha trabajado en determinados fines de semana pero que se han considerado como no trabajados en la Figura 8.1 en compensación a los días entre semana en los que no se ha realizado trabajo.



Para los días de diseño y simulaciones se considera que se trabaja durante 2 horas/día por una única persona y, para los días de fabricación, se considera un trabajo de 3 horas/días por 2 personas. Se considera que un ingeniero junior recién titulado cobra 1500 €/mes trabajando 9 horas/día, lo que resultaría ser en un mes de 31 días y 4 fines de semana, un sueldo de 7.25 €/hora. Por otra parte, un operario de fábrica se estima que cobra 1200€/mes trabajando 9 horas/día, por lo que en el mismo espacio de tiempo que el considerado en el caso anterior, tendría un sueldo de 5.80 €/hora. En la Tabla 8.1 se expone el coste total de los trabajadores por el diseño y fabricación de la cascada lateral del monoplaza.

Tabla 8.1. Coste de los trabajadores.

Concepto	Coste/hora (€/hora)	Horas/día	Número de trabajadores	Número de días	Coste total (€)
Coste de ingeniería	7,25	2	1	83	1.245
Coste de fabricación	5,80	3	2	39	1.357,2

Por otra parte, se extrae del “Cost Report” entregado a la competición Formula Student Spain tanto el coste de fabricación en material de los distintos elementos que componen la cascada lateral, como el coste de procesos de fabricación y tornillería. Estos costes se plasman a modo de resumen en la Tabla 8.2. En los documentos presentados al “Cost report” de la competición que se encuentran en el anexo se puede observar con más detalle todos los costes de fabricación de la cascada lateral.

Tabla 8.2. Coste de fabricación en material, procesos y tornillería de la cascada lateral.

Concepto	Coste/unidad (€)	Cantidad	Coste total (€)
Endplate interior	31,68	2	63,35
Endplate exterior	87,17	2	174,33
Perfil principal	151,26	2	302,53
Slat	42,85	2	85,70
Perfil secundario y terciario	22,84	4	91,36
Costilla slat	1,91	4	7,63
Costilla perfil principal	3,96	4	15,82
Costilla perfil secundario y terciario	1,23	8	9,80
Procesos de fabricación	-	-	34,63
Tornillería 8,8 y 15 mm largo	0,016	10	0,16
Tornillería 8,8 y 12 mm largo	0,016	32	0,51

Por último, tras sumar los distintos costes de fabricación se calcula el coste total de fabricación de la cascada lateral, que puede observarse a modo de resumen en la Tabla 8.3

*Tabla 8.3. Coste total de la cascada lateral.*

Concepto	Coste total (€)
Coste ingeniero	1.245
Coste operarios	1.357,20
Coste material cascada	750,53
Coste procesos	34,63
Coste tornillería	0,67
<b>Coste total</b>	<b>3.388,03</b>

## 9 Conclusiones

- **Se ha conseguido un aumento de la carga aerodinámica generada por el vehículo manteniendo constante la eficiencia aerodinámica:**

Se mantiene constante la relación  $\frac{C_L}{C_D} = 1.9$  tanto con la cascada lateral instalada como sin ella, permitiendo un aumento de la carga aerodinámica generada del 15.705 %, generando -57,527 N de sustentación vertical. Con ello, la carga lateral admitida por cada neumático aumenta, permitiendo tomar las reviradas curvas de los circuitos del skidpad o de la prueba de resistencia a mayor velocidad o tomarlas a la misma velocidad con un menor desgaste de los neumáticos.

- **Se ha logrado una mejora en los procesos de fabricación con respecto a la temporada pasada:**

El proceso de fabricación mediante corte por sierra de hilo caliente de los núcleos de poliestireno extruido ha permitido la fabricación de unos perfiles alares de una excelente calidad y resistencia. Estos han pasado todas las verificaciones de la competición, a diferencia de la pasada temporada, en la que el alerón delantero no pasó las verificaciones y no pudo ser empleado en la competición.

En la Figura 9.1 se puede observar una de las pruebas de deformación que el equipo realizó en el taller, en las que se sometió al perfil más crítico del kit aerodinámico, el perfil principal del alerón delantero, a la acción de 4 discos de 20 kg cada uno (80 kg en total), resultando una deformación vertical de sólo 5 mm, por lo que se verifica la gran resistencia que estos perfiles aerodinámicos poseen a la deformación vertical.

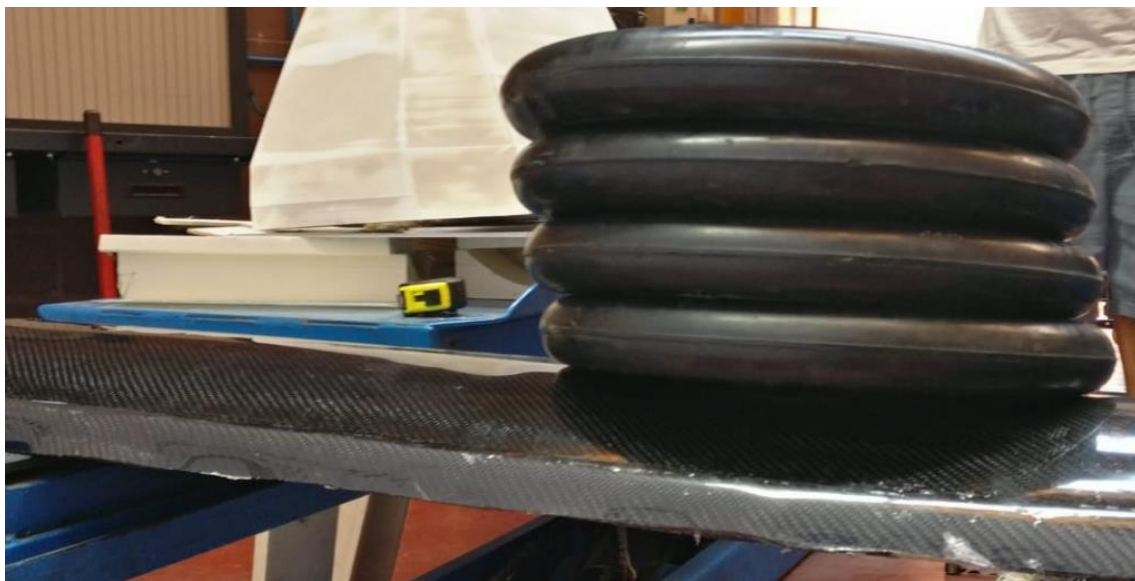


Figura 9.1. Prueba de deformación del perfil principal del alerón delantero.

- **Se han conseguido mejorar los resultados obtenidos en la prueba de diseño de la competición:**

Los jueces valoraron positivamente la inclusión de la cascada lateral y de cómo el equipo defendió su inclusión en el monoplaça. Sin embargo, no se justificó adecuadamente la introducción de un slat por delante del perfil principal, por lo que no se obtuvieron todos los puntos posibles por la inclusión de la cascada lateral.

- **Se han mantenido unos costes de fabricación reducidos:**

Dado que el diseño y la fabricación se ha llevado a cabo por alumnos de la universidad, el coste humano ha sido nulo. En cuanto al coste material, dado que las resinas empleadas y la fibra de carbono ha sido proporcionados por los patrocinadores del equipo, todo el coste material ha ido destinado a las planchas de poliestireno extruido y al tapagrietas ligero, materiales de un reducido coste económico.

- **Se ha creado un diseño sencillo que permite su montaje y desmontaje rápido:**

Los componentes de la cascada lateral van unidos entre sí mediante tornillos y se anclan al monocasco de la misma manera, por lo que el tiempo de montaje y desmontaje de la misma no supera los 10 minutos.

- **Se ha logrado presentar un coche que sea atractivo para los distintos patrocinadores que permiten que este proyecto sea viable:**

El coche ha aparecido en la televisión y en las distintas redes sociales de la competición y del equipo Formula UC3M, logrando una gran visibilidad de todos y cada uno de los patrocinadores que han contribuido a este proyecto.

## 10 Trabajos futuros

De acuerdo con los resultados, se llega a la conclusión de que la cascada lateral ha aportado un extra de rendimiento al paquete aerodinámico del C3-R18, pero se observa que, al tener que emplear los mismos perfiles alares que se emplearon en el alerón delantero para simplificar la fabricación y lograr un ahorro en costes, no se ha exprimido esta idea hasta su máximo exponente.

Es por ello por lo que, para la próxima temporada, se deberán estudiar y analizar nuevos perfiles aerodinámicos que permitan adaptarse en mejor medida a las singularidades de la zona en la que se encuentra esta cascada lateral, con el único fin de maximizar el rendimiento que la cascada lateral pueda aportar al conjunto del vehículo.

Vistos los coches que se están presentando a la competición en 2018, se observa una tendencia de los equipos a incluir en la zona lateral unos pontones de tamaño muy reducido y, en la zona exterior del monoplaza, una cascada lateral de un tamaño inferior a la que se ha diseñado para el C3-R18. Por esta razón, para un plazo de tiempo medio-largo, se deberá de estudiar si el rendimiento aerodinámico de tener una cascada lateral de grandes dimensiones es la mejor opción o si, por el contrario, es más beneficioso el hecho de tener una cascada más reducida junto con los pontones en los que van incluidos los radiadores, con el fin de tener una trasera más limpia en la que el difusor pueda tener un mayor tamaño y generar más carga aerodinámica.

Por otro lado, de cara a las siguientes temporadas, se deben empezar a verificar los datos obtenidos en las simulaciones de CFD en túnel de viento, para asegurar una adecuada correlación de las simulaciones en ordenador con los resultados en pista.

Por último, en cuanto al apartado de fabricación, se deberá de fabricar el gurney flap en impresión 3D que para esta temporada no ha sido posible debido a la retirada de apoyo por parte de uno de los patrocinadores. También sería conveniente fabricar los moldes de los perfiles alares, tal y como se diseñaron, ya que supondrían un importante ahorro en tiempo y personal que se podrían dedicar a la fabricación de otros elementos del monoplaza.

## 11 Bibliografía

- [1] "Airfoil database", *Airfoil Tools*. [En línea]. Disponible en: <http://www.airfoiltools.com/>
- [2] "An International Design Competition", *Formula Student Germany*, Magazine 2017. pp 10-15, julio 2017. [En línea]. Disponible en: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2017/PR/FSG2017\\_magazine\\_v20170726\\_LQ.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2017/PR/FSG2017_magazine_v20170726_LQ.pdf). Acceso: 22-06-2018.
- [3] "Clasificación como flujo laminar o turbulento", *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, diciembre 2009. [En línea]. Disponible en: [http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/laminar\\_turbulento.htm](http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/laminar_turbulento.htm)
- [4] C. Chaves, "La Fórmula Student, el Mundial de los futuros ingenieros", *Mundo deportivo*, 19-11-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.mundodeportivo.com/motor/20171119/433016110845/la-formula-student-el-mundial-de-los-futuros-ingenieros.html>
- [5] "DUT 16: Taking it laterally", *Formula Student Team Delft*. [En línea]. Disponible en: <https://www.fsteamdelft.nl/dut16-gallery>
- [6] "Fluid Mechanics for Mechanical Engineers/Technical Applications", *Wikiversity*, 31-05-2018. [En línea]. Disponible en: [https://en.wikiversity.org/wiki/Fluid\\_Mechanics\\_for\\_Mechanical\\_Engineers/Technical\\_Applications](https://en.wikiversity.org/wiki/Fluid_Mechanics_for_Mechanical_Engineers/Technical_Applications)
- [7] F. M. White, *Mecánica de Fluidos*, 6ª edición. Madrid: Mc Graw Hill, 2008.
- [8] "Formula Student Rennteam der Hochschule", *High Speed Karlsruhe*, agosto 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.hs-karlsruhe.de/mmt/studentische-projekte/high-speed-karlsruhe/>
- [9] "Formula Student Rules 2018", *Formula Student Germany*, 2017. [En línea]. Disponible en: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2018/rules/FS-Rules\\_2018\\_V1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2018/rules/FS-Rules_2018_V1.1.pdf)
- [10] "#FSG2018 says thank you and congratulates all winners", *Formula Student Germany*, 12-08-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/fsg18-says-thank-you-and-congratulates-all-winners/>
- [11] "FSUPV-04: WINNER AT FSN", *FSUPV TEAM*, julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://fsupv2017.webs.upv.es/index.php/fsupv-04/>
- [12] "Generadores de vórtices: qué son y para qué se utilizan", *Safety car*, 10-08-2014. [En línea]. Disponible en: <http://safety-car.es/thread-5626.html>
- [13] J. Martínez Castañeda, "¿Qué es la Formula Student?", *Pistonudos*, 22-10-2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.pistonudos.com/reportajes/que-es-la-formula-student/>



- [14] J. de la Cuerva, "Capa límite", *Blog de Juan de la Cuerva*, 7-03-2008. [En línea]. Disponible en: <http://juandelacuerva.blogspot.com/2008/03/capa-lmite.html>
- [15] J. P. Torres Papaqui, "Lagrange y Euler", *Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato*, 2018. [En línea]. Disponible en: [http://www.astro.ugto.mx/~papaqui/ondasyfluidos/Tema\\_2.07-Lagrange\\_y\\_Euler.pdf](http://www.astro.ugto.mx/~papaqui/ondasyfluidos/Tema_2.07-Lagrange_y_Euler.pdf)
- [16] M. Vera Coello, I. Iglesias Estrade, A. L. Sánchez Pérez, *Ingeniería Fluidomecánica*, Madrid: Paraninfo, 2012.
- [17] "Nuestro coche, el C3-R16", *Formula UC3M*, agosto 2017. [En línea]. Disponible en: <http://formulauc3m.com/temporadas/n2015-16/>
- [18] "Nuestro nuevo prototipo, el C3-R17", *Formula UC3M*, agosto 2017. [En línea]. Disponible en: <http://formulauc3m.com/temporadas/n2016-17/>
- [19] S. Posada, A. Jiménez Giraldo, "Programación Ingeniería Mecánica", *Wikiversity*, 12-10-2015. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikiversity.org/wiki/ProgramacionIngenieriaMecanicaUPB:Grupo\\_1510\\_02](https://es.wikiversity.org/wiki/ProgramacionIngenieriaMecanicaUPB:Grupo_1510_02)
- [20] "Technical Inspection", *Handbook Formula Student Spain*, pp, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://formulastudent.es/wp-content/uploads/2017/08/handbook2017-baja.pdf>. Acceso: 22-06-2018.
- [21] "15-years TU Graz Racing Team", *Newsletter October/November TU GRAZ Racing Team*, nº 1, pp 6-11, noviembre 2017. [En línea]. Disponible en: [https://racing.tugraz.at/wp-content/uploads/Newsletter/2018/Newsletter\\_OctNov\\_2018\\_en.pdf](https://racing.tugraz.at/wp-content/uploads/Newsletter/2018/Newsletter_OctNov_2018_en.pdf). Acceso: junio 2018.



## 12 Anexos

### 12.1 Código en Matlab R2017b para la creación de perfiles

```
clear; clc;

% 0. Initial array 'airfoil' building
% 0.1 Open the file
filename = input('File name? ','s');
fileID = fopen(filename,'r');

% 0.2 Read the file
formatSpec = '%f %f\n';
sizeMatrix = [2, inf];
airfoil_02 = fscanf(fileID,formatSpec,sizeMatrix);
fclose(fileID);

% 0.3 Initialize all airfoil arrays to be used in the process
% (reason: quickness)
% IMPORTANT INFO: row 1 is x-pos, row 2 is y-pos
points = length(airfoil_02)-8;
airfoil_04 = zeros(2,points);
airfoil_1 = zeros(2,points);
airfoil_2 = zeros(2,points);
airfoil_3 = zeros(2,points);
airfoil_4 = zeros(3,points);
airfoil_5 = zeros(3,points);
airfoil_6 = zeros(3,points);

% 0.4 Delete near-TE points
for j = 1:2
    for i = 1:points
        airfoil_04(j,i) = airfoil_02(j,i+4);
    end
end

% 1. Invert coords for y (we want DF, no L!!)
for i = 1:points
    airfoil_1(1,i) = airfoil_04(1,i);
    airfoil_1(2,i) = -airfoil_04(2,i);
end

% 2. Resize using chord length (initially, c = 1)
c = input('Chord (c [mm])? ');
for j = 1:2
    for i = 1:points
        airfoil_2(j,i) = c*airfoil_1(j,i);
    end
end

% 3. Rotate: angle of attack
alpha_deg = input('AoA (alpha [°])? ');
```



```
% Minus sign since what rotates is the ref. frame CW, not the airfoil
CCW
alpha = -alpha_deg*pi/180;
for i = 1:points
    % Remainder: row1 is x; row2 is y
    % x' = cos(alpha)*x + sin(alpha)*y
    airfoil_3(1,i) = cos(alpha)*airfoil_2(1,i) +
sin(alpha)*airfoil_2(2,i);
    % y' = -sin(alpha)*x + cos(alpha)*y
    airfoil_3(2,i) = -sin(alpha)*airfoil_2(1,i) +
cos(alpha)*airfoil_2(2,i);
end

% 4. Rearrange axes
% x pos in the file in actually -z pos for our car CAD axes
for i = 1:points
    airfoil_4(3,i) = -airfoil_3(1,i);
    airfoil_4(2,i) = airfoil_3(2,i);
    airfoil_4(1,i) = 0;
end

% 5. Change origin
% Note that (0,0) is the LE, and what we know are coords for TE
LE_Zpos = input('Z pos. of LE (LE_Zpos [mm])? ');
LE_Ypos = input('Y pos. of LE (LE_Ypos [mm])? ');
for i = 1:points
    airfoil_5(3,i) = airfoil_4(3,i) + LE_Zpos;
    airfoil_5(2,i) = airfoil_4(2,i) + LE_Ypos;
end

% 6. Build the new file
% 6.1 Create the new file
filename = input('File name? ','s');
fileID = fopen(filename,'w');

% 6.2 Write the file
airfoil_6 = airfoil_5.';

for i = 1:points
    formatSpec = '%f %f %f\r\n';
    fprintf(fileID,formatSpec,airfoil_6(i,:));
end
fclose(fileID);
```

## 12.2 Tablas de configuraciones simuladas

### 12.2.1 Configuraciones con perfil principal de cuerda 375 mm

Tabla 12.1. Configuración de la Cascada 1.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-20	/	/
Perfil principal	375	8.5	40	10
Perfil secundario	150	30	27	25
Perfil terciario	150	55	24	17

Tabla 12.2. Configuración de la Cascada 2.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-20	/	/
Perfil principal	375	9	40	10
Perfil secundario	150	38	25	10
Perfil terciario	150	58	25	5

Tabla 12.3. Configuración de la cascada 3.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-19	/	/
Perfil principal	375	7.5	40	10
Perfil secundario	150	38	27	10
Perfil terciario	150	55	20	0

Tabla 12.4. Configuración de la Cascada 4.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-19	/	/
Perfil principal	375	7.5	40	10
Perfil secundario	150	45	20	10
Perfil terciario	150	60	25	0

Tabla 12.5. Configuración de la Cascada 5.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	375	9	40	10
Perfil secundario	150	32.5	27	25
Perfil terciario	150	55	22	17

Tabla 12.6. Configuración de la Cascada 6.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	375	9	50	20
Perfil secundario	150	25	30	18
Perfil terciario	150	45	25	12

Tabla 12.7. Configuración de la Cascada 7.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	375	9	50	20
Perfil secundario	150	28	30	15
Perfil terciario	150	50	25	10

Tabla 12.8. Configuración de la Cascada 8.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	375	9	50	10
Perfil secundario	150	40	22	5
Perfil terciario	150	60	25	0

Tabla 12.9. Configuración de la Cascada 9.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	375	9	50	20
Perfil secundario	150	28	30	18
Perfil terciario	150	45	25	12

Tabla 12.10. Configuración de la Cascada 11.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	375	9	50	20
Perfil secundario	150	33	25	10
Perfil terciario	150	45	30	10

Tabla 12.11. Configuración de la Cascada 12.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	130	-14	/	/
Perfil principal	375	7	50	10
Perfil secundario	150	32.5	27	25
Perfil terciario	150	55	22	17

Tabla 12.12. Configuración de la Cascada 13.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	130	-14	/	/
Perfil principal	375	8	35	30
Perfil secundario	150	32.5	27	25
Perfil terciario	150	55	22	17

Tabla 12.13. Configuración de la Cascada 14.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	130	-14	/	/
Perfil principal	375	9	32	30
Perfil secundario	150	32.5	28	30
Perfil terciario	150	55	22	17

Tabla 12.14. Configuración de la Cascada 16.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	130	-14	/	/
Perfil principal	375	9	32	30
Perfil secundario	150	28	30	16
Perfil terciario	150	50	25	17

### 12.2.2 Configuraciones con perfil principal de cuerda 425 mm

Tabla 12.15. Configuración de la Cascada 18.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	9	50	20
Perfil secundario	150	32.5	30	10
Perfil terciario	150	55	24	0

Tabla 12.16. Configuración de la Cascada 19.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	8.5	50	20
Perfil secundario	150	40	25	10
Perfil terciario	150	60	25	3

Tabla 12.17. Configuración de la Cascada 20.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	10	50	20
Perfil secundario	150	32.5	30	10
Perfil terciario	150	55	24	0

Tabla 12.18. Configuración de la Cascada 21.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	32.5	30	10
Perfil terciario	150	55	24	0

Tabla 12.19. Configuración de la Cascada 22.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-10	/	/
Perfil principal	425	9	58	20
Perfil secundario	150	32.5	30	10
Perfil terciario	150	55	24	0

Tabla 12.20. Configuración de la Cascada 23.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-14	/	/
Perfil principal	425	9	58	20
Perfil secundario	150	32.5	30	10
Perfil terciario	150	55	24	0



Tabla 12.21. Configuración de la Cascada 24.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-20	/	/
Perfil principal	425	9	58	20
Perfil secundario	150	32.5	30	10
Perfil terciario	150	55	24	0

Tabla 12.22. Configuración de la Cascada 25.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	32.5	30	10
Perfil terciario	150	55	24	0
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.23. Configuración de la Cascada 26.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	32.5	30	10
Perfil terciario	150	55	24	0
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.24. Configuración de la Cascada 27.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	32.5	24	15
Perfil terciario	150	55	20	10
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.25. Configuración de la Cascada 28.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	32.5	30	10
Perfil terciario	150	55	24	0
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.26. Configuración de la Cascada 29.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	32.5	24	15
Perfil terciario	150	55	20	0
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.27. Configuración de la Cascada 30.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	40	20	12
Perfil terciario	150	55	30	10
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.28. Configuración de la Cascada 31.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	43	15
Perfil secundario	150	32.5	27	25
Perfil terciario	150	55	22	17
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.29. Configuración de la Cascada 32.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	43	15
Perfil secundario	150	35	24	20
Perfil terciario	150	55	23	14
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.30. Configuración de la Cascada 33.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	43	15
Perfil secundario	150	40	20	18
Perfil terciario	150	55	29	15
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.31. Configuración de la Cascada 34.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	34	27	0
Perfil terciario	150	55	24	0
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.32. Configuración de la Cascada 35.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	38	25	0
Perfil terciario	150	55	28	5
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.33. Configuración de la Cascada 36.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	32.5	30	10
Perfil terciario	150	55	24	0
Dúplex	150	25	/	/

Tabla 12.34. Configuración de la Cascada 38.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	13	47	20
Perfil secundario	150	34	27	0
Perfil terciario	150	55	24	0
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.35. Configuración de la Cascada 39.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	15	47	20
Perfil secundario	150	34	27	0
Perfil terciario	150	55	24	0
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.36. Configuración de la Cascada 41.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (FX74_CL5_140)	150	-18	/	/
Perfil principal	425	11	50	20
Perfil secundario	150	36	27	0
Perfil terciario	150	58	27	5
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.37. Configuración de la Cascada 42.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE5740)	130	-14	/	/
Perfil principal	425	9	30	40
Perfil secundario	150	32.5	25	20
Perfil terciario	150	55	25	10
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.38. Configuración de la Cascada 43.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	150	-14	/	/
Perfil principal	425	10	25	40
Perfil secundario	150	32.5	25	20
Perfil terciario	150	55	25	10
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.39. Configuración de la Cascada 44.

Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	150	-14	/	/
Perfil principal	425	8	32	45
Perfil secundario	150	32.5	25	20
Perfil terciario	150	55	25	10
Dúplex	150	15	/	/

Tabla 12.40. Configuración de la Cascada 45.

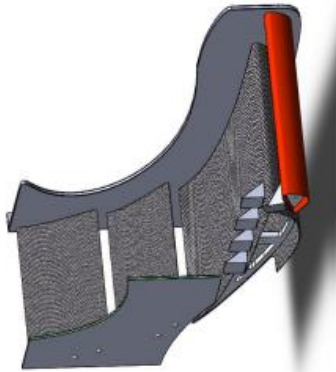
Perfil	Cuerda [mm]	Ángulo de ataque [°]	Gap [mm]	Overlap [mm]
Slat (GOE570)	150	-14	/	/
Perfil principal	425	7	35	45
Perfil secundario	150	32.5	25	20
Perfil terciario	150	55	25	10
Dúplex	150	15	/	/

## 12.3 “Cost-report” de la cascada lateral

Asm Cost	€	801,63
Qty		1
Extended Cost	€	801,63

373

Car #



ItemOrder	Part	Part Cost	Quantity	Sub Total
3401	Inner endplate	€	2	€ 64,59
3402	Outter endplate	€	2	€ 178,07
3403	Lateral main flap	€	2	€ 309,41
3404	Lateral slat flap	€	2	€ 87,71
3405	Lateral secondary and tertiary flap	€	4	€ 93,30
3406	Slat rib	€	4	€ 7,63
3407	Main rib	€	4	€ 15,82
3408	Secondary and tertiary rib	€	8	€ 9,80
			<b>Sub Total</b>	<b>€ 766,34</b>

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
1	Assemble, 1 Kg. Line-on-line	Flaps assemble	€ 0,13		16			€ 2,08
4	Fasteners- Hand- Start only	Front wing fasteners assemble	€ 0,12		42	Fastener Engagement Le	1,25	€ 6,30
5	Screwdriver > 1 Turn	Front wing fasteners assemble	€ 0,50		42	Fastener Engagement Le	1,25	€ 26,25
							<b>Sub Total</b>	<b>€ 34,63</b>

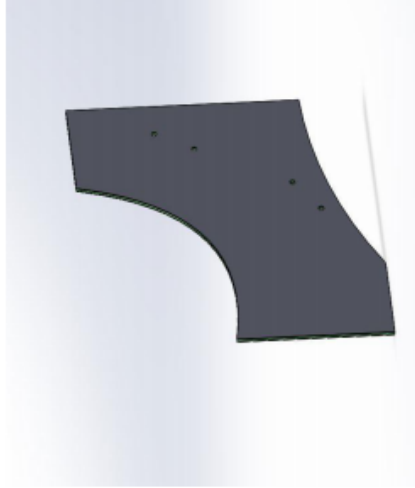
ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
1	Bolt, Grade 8.8	Front wing- Monocoque attaching	€ 0,02		6 mm		15 mm		10 € 0,16
2	Bolt, Grade 8.8	Front wing flaps assembly	€ 0,02		4 mm		12 mm		32 € 0,51
								Sub Total	€ 0,66



University	Universidad Carlos III de Madrid	Car #	373	Part Cost	€	32,30
System	Frame and Body			Qty		2
Assembly	Lateral aerodynamic wing			Extended Cost	€	64,59
Part	Inner endplate					
P/N Base	03401					
Suffix	AA					
Details	Made					

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
1	Carbon Fiber, 1 ply	Inner endplate carbon fiber (Pre-preg)	€ 200,00	0,02	Kg				0,06210	0,0002	1.580,00	4 € 12,56
2	Structural foam	Inner endplate core	€ 125,00	0,01	Kg				0,06210	0,0030	70,00	1 € 1,63
											Sub Total	€ 14,19

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
1	Machining Setup, Install and remove cut	Machining setup for prepreg cut	€ 1,30	unit	1			€ 1,30
2	Waterjet Cut	Endplate shape cut (foam)	€ 0,01	cm	113,635			€ 1,14
3	Waterjet Cut	Endplate shape cut (carbon fiber)	€ 0,01	cm	113,635	Repeat 4		€ 4,55
4	Lamination, Manual	Lamination process of the two skins	€ 35,00	m^2	0,06210	Repeat 4		€ 8,69
5	Assemble, 1kg, loose	Assemble of two skins and core in the middle	€ 0,06	unit	1			€ 0,06
6	Vacuum	Compaction	€ 10,00	m^2	0,06210			€ 0,62
7	Cure, oven	Carbon fiber curing process	€ 20,00	m^2	0,062			€ 1,24
8	Drilled holes <25.4 mm dia.	Fasteners holes (core and carbon fiber)	€ 0,04	hole	11			€ 0,39
							Sub Total	€ 17,98



ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncid	Sub Total
1	Lamination - Flat Panel Tool	Endplate carbon fiber lamination	€ 1,500,00	m^2	0,1242	3000	2	€ 0,12
							Sub Total	€ 0,12

University	Universidad Carlos III de Madrid	Car #	373	Part Cost	€	89,04
System	Frame and Body			Qty		2
Assembly	Lateral aerodynamic wing			Extended Cost	€	178,07
Part	Outer endplate					
P/N Base	03402					
Suffix	AA					
Details	Made					

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
1	Carbon Fiber, 1 ply	Inner endplate carbon fiber (Pre-preg)	€ 200,00	0,05	Kg				0,18700	0,0002	1,580,00	€ 37,82
2	Structural foam	Inner endplate core	€ 125,00	0,04	Kg				0,18700	0,0030	70,00	€ 4,91
											Sub Total	€ 42,73



ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
1	Machining Setup, Install and remove cut	Machining setup for prepreg cut	€ 1,30	unit	1			€ 1,30
2	Waterjet Cut	Endplate shape cut (foam)	€ 0,01	cm	248			€ 2,48
3	Waterjet Cut	Endplate shape cut (carbon fiber)	€ 0,01	cm	248	Repeat 4		€ 9,92
4	Lamination, Manual	Lamination process of the two skins	€ 35,00	m^2	0,1870	Repeat 4		€ 26,18
5	Assemble, 1kg, loose	Assemble of two skins and core in the middle	€ 0,06	unit	1			€ 0,06
6	Vacuum	Compaction	€ 10,00	m^2	0,1870			€ 1,87
7	Cure, oven	Carbon fiber curing process	€ 20,00	m^2	0,1870			€ 3,74
8	Drilled holes <25,4 mm dia.	Fasteners holes (core and carbon fiber)	€ 0,04	hole	11			€ 0,39
							Sub Total	€ 45,94

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncl	Sub Total
1	Lamination - Flat Panel Tool	Endplate carbon fiber lamination	€ 1.500,00	m^2	0,374	3000	2	€ 0,37
							Sub Total	€ 0,37

University Universidad Carlos III de Madrid  
System Frame and Body  
Assembly Lateral aerodynamic wing  
Part Lateral main flap  
P/N Base 03403  
Suffix AA  
Details Made

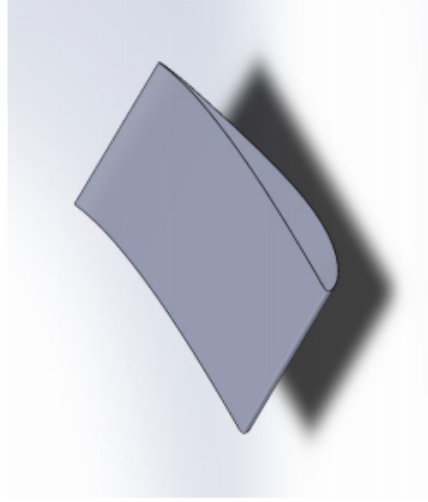
Car # 373

Part Cost € 154,70  
Qty 2

Extended Cost € 309,41

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
1	Carbon Fiber, 1 ply	Inner main wing carbon fiber (Pre-preg)	€ 200,00	0,09	Kg			0,34383		0,0002	1.580,00	4 € 69,54
2	Structural foam	Inner main wing core	€ 125,00	0,03	Kg			0,34383		0,0030	30,00	1 € 3,87
											Sub Total	€ 73,40

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
1	Machining, Setup, Install and remove	Foam preparation	€ 1,30	unit	1			€ 1,30
2	Shape	Cutting shape waterjet	€ 0,01	cm	960			€ 9,60
3	Machining, Setup, Change	Position change	€ 0,65	unit	1			€ 0,65
4	Waterjet Cut	Wing shape cut (carbon fiber)	€ 0,01	cm	120 Repeat 4			€ 4,80
5	Lamination, Manual	Lamination process of the two skins	€ 35,00	m^2	0,3438 Repeat 4			€ 48,14
6	Liquid applicator gun	Lamination process (skins sealant )	€ 0,02	cm	120			€ 2,40
7	Vacuum	Compaction	€ 10,00	m^2	0,34383			€ 3,44
8	Cure, oven	Carbon fiber curing process	€ 20,00	m^2	0,34383			€ 6,88
9	Painting	Aerosol apply	€ 5,25	m^2	0,34383			€ 1,81
								Sub Total € 79,01



ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncl	Sub Total
1	Lamination - Mold tool	Carbon fiber lamination - shaped mold	€ 20.000,00	m^2	0,344	3000	1	€ 2,29
								Sub Total € 2,29

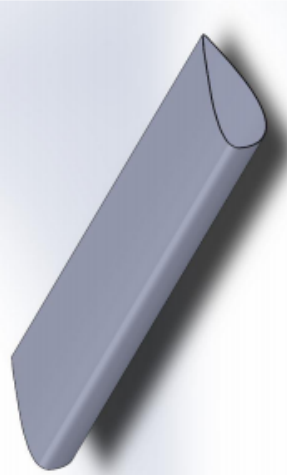
University Universidad Carlos III de Madrid  
System Frame and Body  
Assembly Lateral aerodynamic wing  
Part Lateral slat flap  
P/N Base 03404  
Suffix AA  
Details Made

Car # 373 Part Cost € 43,86 Qty 2

Extended Cost € 87,71

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
1	Carbon Fiber, 1 ply	slat wing carbon fiber (Pre-preg)	€ 200,00	0,03	kg				0,10067	0,0002	1.580,00	4 € 20,36
2	Structural foam	Slat wing core	€ 125,00	0,01	kg				0,10067	0,0030	30,00	1 € 1,13
											Sub Total	€ 21,49

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
1	Machining, Setup, Install and remove	Foam preparation	€ 1,30	unit	1			€ 1,30
2	Shape	Cutting shape waterjet	€ 0,01	cm	30			€ 0,30
3	Machining, Setup, Change	Position change	€ 0,65	unit	1			€ 0,65
4	Waterjet Cut	Wing shape cut (carbon fiber)	€ 0,01	cm	30 Repeat 4			€ 1,20
5	Lamination, Manual	Lamination process of the two skins	€ 35,00	m^2	0,10067 Repeat 4			€ 14,09
6	Liquid applicator gun	Lamination process (skins sealant )	€ 0,02	cm	30,000000			€ 0,60
7	Vacuum	Compaction	€ 10,00	m^2	0,10067			€ 1,01
8	Cure, oven	Carbon fiber curing process	€ 20,00	m^2	0,10067			€ 2,01
9	Painting	Aerosol apply	€ 5,25	m^2	0,10067			€ 0,53
								Sub Total € 21,69

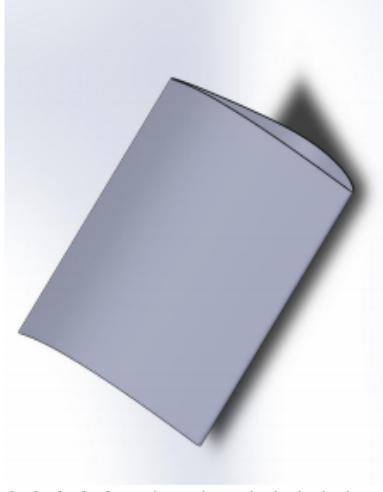


ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncid	Sub Total
1	Lamination - Mold tool	Carbon fiber lamination - shaped mold	€ 20.000,00	m^2	0,101	3000	1	€ 0,67
								Sub Total € 0,67

University	Universidad Carlos III de Madrid
System	Frame and Body
Assembly	Lateral aerodynamic wing
Part	Lateral secondary and tertiary flap
P/N Base	03405
Suffix	AA
Details	Made
Car #	373
Part Cost	€ 23,32
Qty	4
Extended Cost	€ 93,30

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
1	Carbon Fiber, 1 ply	Inner endplate carbon fiber (Pre-preg)	€ 200,00	0,012	kg			0,04839		0,0002	1.580,00	4 € 9,79
2	Structural foam	Inner endplate core	€ 125,00	0,004	kg			0,04839		0,0030	30,00	1 € 0,54
											Sub Total	€ 10,33

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
1	Machining, Setup, Install and remove	Foam preparation	€ 1,30	unit	1			€ 1,30
2	Shape	Cutting shape waterjet	€ 0,01	cm	32			€ 0,32
3	Machining, Setup, Change	Position change	€ 0,65	unit	1			€ 0,65
4	Waterjet Cut	Wing shape cut (carbon fiber)	€ 0,01	cm	32 Repeat 4			€ 1,28
5	Lamination, Manual	Lamination process of the two skins	€ 35,00	m^2	0,04839 Repeat 4			€ 6,78
6	Liquid applicator gun	Lamination process (skins sealant )	€ 0,02	cm	32			€ 0,64
7	Vacuum	Compaction	€ 10,00	m^2	0,04839			€ 0,48
8	Cure, oven	Carbon fiber curing process	€ 20,00	m^2	0,04839			€ 0,97
9	Painting	Aerosol apply	€ 5,25	m^2	0,04839			€ 0,25
							Sub Total	€ 12,67



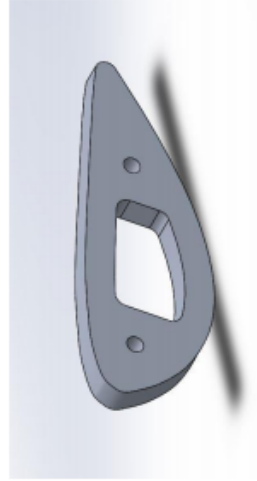
ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncl	Sub Total
1	Lamination - Mold tool	Carbon fiber lamination - shaped mold	#####	m^2	0,048	3000	1	€ 0,32
							Sub Total	€ 0,32

University Universidad Carlos III de Madrid  
System Frame and Body  
Assembly Lateral aerodynamic wing  
Part Slat rib  
P/N Base 03406  
Suffix AA  
Details Made

Car # 373  
Part Cost € 1,91  
Qty 4  
Extended Cost € 7,63

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
1	Aluminum, premium	Raw material for the ribs	€ 4,20	0,03737136	kg			0,014	0,0010	2712	1	€ 0,16
											Sub Total	€ 0,16

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
1	Machining Setup- Install and remove	Raw material preparation	€ 1,30	unit	0,5			€ 0,65
2	Laser cut	Remove material for airfoil shape and topology optimization	€ 0,01	cm	27,403	Material-Aluminum	1	€ 0,27
3	Laser cut	Remove material for topology optimization	€ 0,01	cm	81,566	Material-Aluminum	1	€ 0,82
4	Threading, Internal (machining)	Threads for endplate assemble	€ 0,01	cm	1	Repeat 2	2	€ 0,01
								Sub Total € 1,75





Part Cost	€	3,96
Qty		4
Extended Cost	€	15,82

Car # 373

University Universidad Carlos III de Madrid  
 System Frame and Body  
 Assembly Lateral aerodynamic wing  
 Part Main rib  
 P/N Base 03407  
 Suffix AA  
 Details Made

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
1	Aluminum, premium	Raw material for the ribs	€ 4,20	0,18047275	Kg				0,067	0,0010	2712	1 € 0,76
											Sub Total	€ 0,76



ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
1	Machining Setup- Install and remove	Raw material preparation	€ 1,30	unit	0,5			€ 0,65
2	Laser cut	Remove material for airfoil shape and topology optimization	€ 0,01	cm	78,27	Material-Aluminum	1 €	0,78
3	Laser cut	Remove material for topology optimization	€ 0,01	cm	175,53	Material-Aluminum	1 €	1,76
4	Threading, Internal (machining)	Threads for endplate assemble	€ 0,01	cm	1	Repeat 2	2 €	0,01
							Sub Total	€ 3,20

Part Cost	€	1,23
Qty		8
Extended Cost	€	9,80

373

Car #


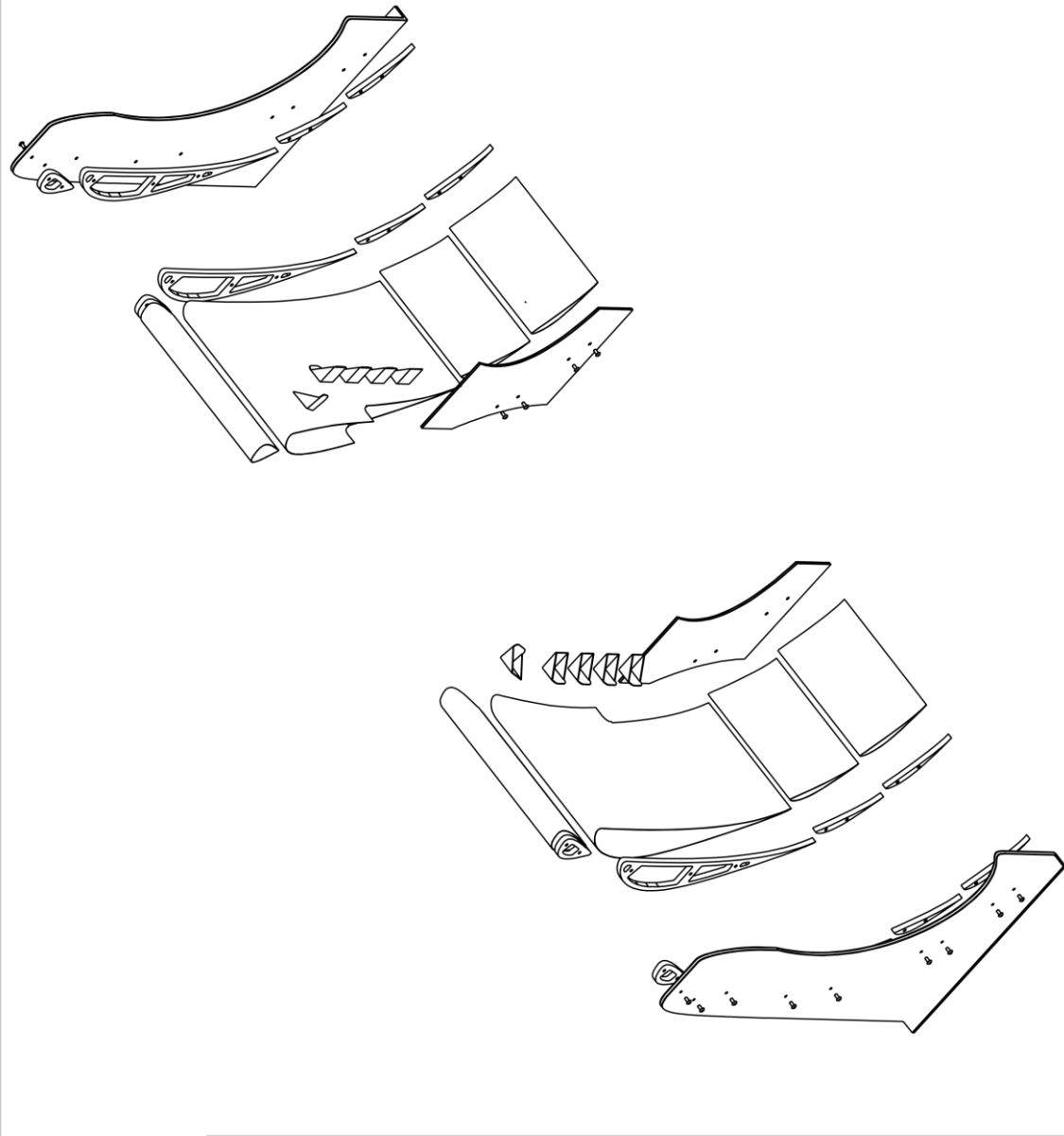
University	Universidad Carlos III de Madrid
System	Frame and Body
Assembly	Lateral aerodynamic wing
Part	Secondary and tertiary rib
P/N Base	03408
Suffix	AA
Details	Made

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
1	Aluminum, premium	Raw material for the ribs	€ 4,20	0,0680495	Kg			0,025	0,0010		2712	1 € 0,29
											Sub Total	€ 0,29

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
1	Machining Setup- Install and remove	Raw material preparation	€ 1,30	unit	0,125			€ 0,16
2	Laser cut	Remove material for airfoil shape and topology optimization	€ 0,01	cm	31,308	Material-Aluminum	1 €	0,31
3	Laser cut	Remove material for topology optimization	€ 0,01	cm	45,411	Material-Aluminum	1 €	0,45
4	Threading, Internal (machining)	Threads for endplate assemble	€ 0,01	cm	1	Repeat 2	2 €	0,01
							Sub Total	€ 0,94



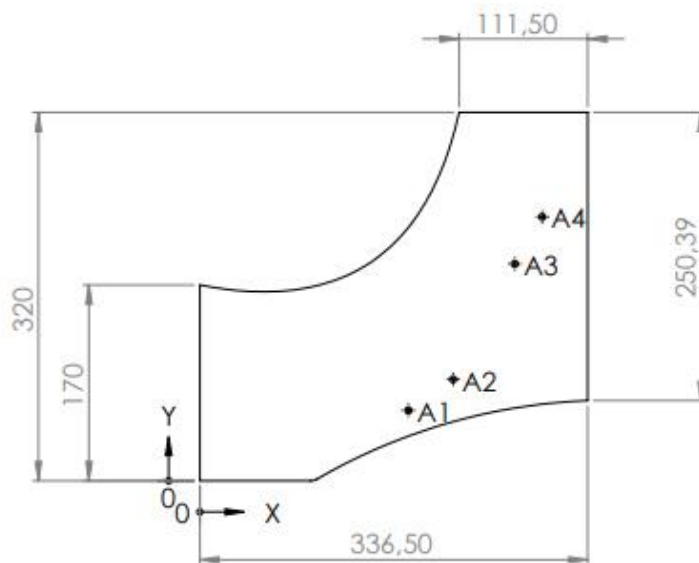
## 12.4 Planos

	<p>PROPERTY OF FORMULA UC3M THIS DRAWING MUST NOT BE REPRODUCED OR DISCLOSED TO THIRD PARTIES WITHOUT PRIOR CONSENT</p>	<p><b>A4</b></p>		
				
<p>TODAS LAS MEDIDAS APLICADAS A LA PIEZA CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ALL DIMENSIONS APPLY TO FINISHED PART AFTER SURFACE TREATMENT</p>		<p>NOMBRE DEL AUTOR / AUTHOR'S NAME <b>Alejandro Agustín Hurtado</b></p>	<p>Nº TELÉFONO / PHONE NUMBER</p>	<p>MATERIAL / MATERIAL:</p>
		<p>PROYECCION ACORDE A ISO R 128 PROJECTION ACCORDING ISO R 128</p> <p>DIBUJADO / DRAWN: <b>Alejandro AH</b></p> <p>FECHA / DATE: <b>16/05/2018</b></p> <p>ESCALA / SCALE: <b>1:50</b></p>	<p>TITULO / TITLE: <b>Lateral Wing Exploded</b></p>	
		<p>ACABADO / FINISH</p>	<p>PLANO N° / DWG No: <b>FSS-18-373-FR-03400-AA</b></p>	



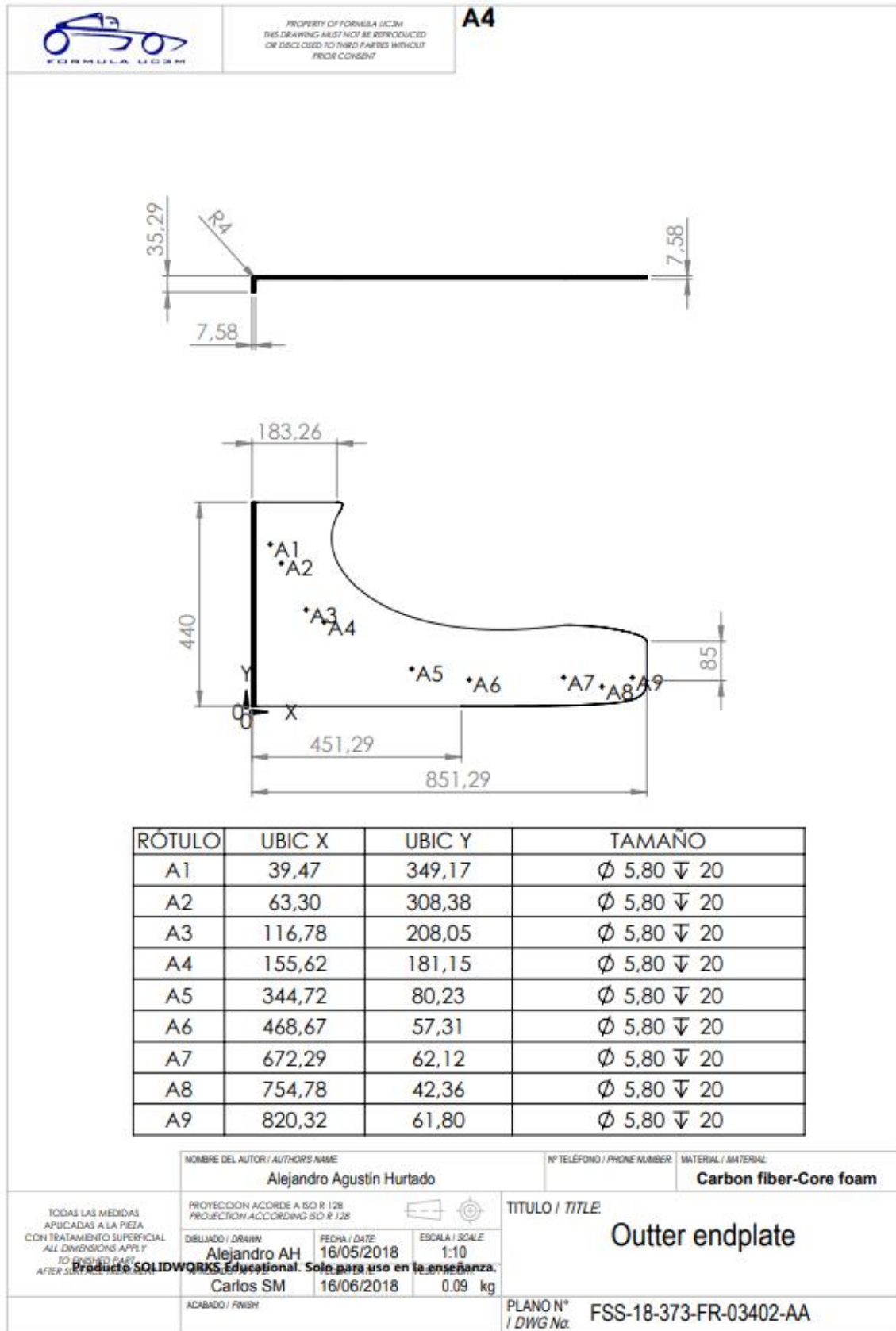
PROPERTY OF FORMULA UC3M  
THIS DRAWING MUST NOT BE REPRODUCED  
OR DISCLOSED TO THIRD PARTIES WITHOUT  
PRIOR CONSENT




A4


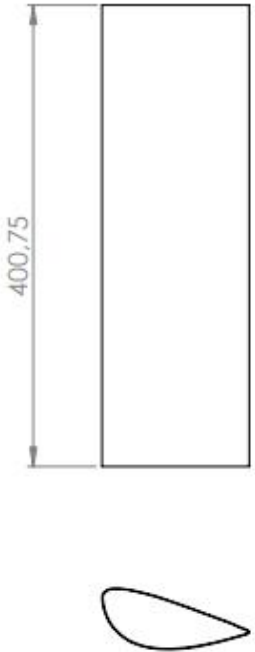


RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	180,88	61,15	Ø 5,80 ▽ 20
A2	219,72	88,05	Ø 5,80 ▽ 20
A3	273,20	188,38	Ø 5,80 ▽ 20
A4	297,03	229,17	Ø 5,80 ▽ 20


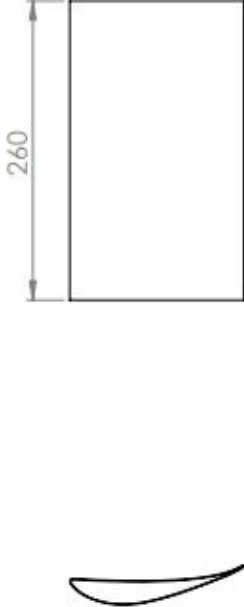
NOMBRE DEL AUTOR / AUTHORS NAME			Nº TELÉFONO / PHONE NUMBER		MATERIAL / MATERIAL	
Alejandro Agustín Hurtado					Carbon fiber-Core foam	
TODAS LAS MEDIDAS AFICADAS A LA PIEZA CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ALL DIMENSIONS APPLY TO FINISHED PART AFTER SURFACE TREATMENT	PROYECCION ACORDE A ISO R 128 PROJECTION ACCORDING ISO R 128				TÍTULO / TITLE	
	DIBUJADO / DRAWN		FECHA / DATE		ESCALA / SCALE	
	Alejandro AH		16/05/2018		1:5	
	Carlos SM		16/06/2018		0.03 kg	
ACABADO / FINISH			PLANO N° / DWG No.		FSS-18-373-FR-03401-AA	


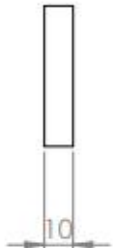
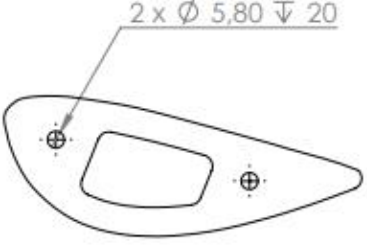



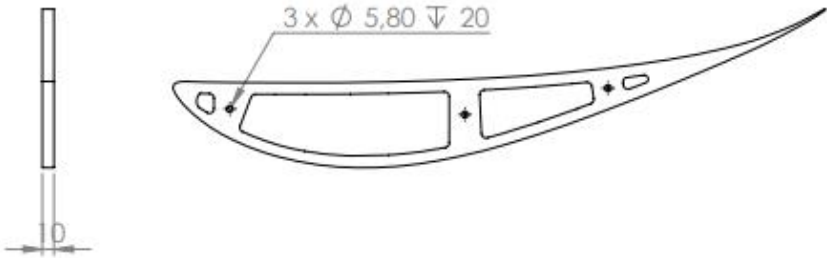

		PROPERTY OF FORMULA 1 GBR THIS DRAWING MUST NOT BE REPRODUCED OR DISCLOSED TO THIRD PARTIES WITHOUT PRIOR CONSENT		<b>A4</b>	
					
					
PROFILE FX74140 570 CORD 0.75 THICKNESS					
NOMBRE DEL AUTOR / AUTHOR'S NAME <b>Alejandro Agustín Hurtado</b>		Nº TELÉFONO / PHONE NUMBER		MATERIAL / MATERIAL <b>Carbon fiber-Core foam</b>	
TODAS LAS MEDIDAS APLICADAS A LA PIEZA CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ALL DIMENSIONS APPLY TO FINISHED PART AFTER SURFACING		PROYECCION ACORDE A ISO R 128 PROJECTION ACCORDING ISO R 128		TÍTULO / TITLE <b>Lateral Main Flap</b>	
DIBUJADO / DRAWN <b>Alejandro AH</b> <b>Carlos SM</b>		FECHA / DATE <b>16/05/2018</b> <b>16/06/2018</b>		ESCALA / SCALE <b>1:10</b> <b>0.12 kg</b>	
ACABADO / FINISH		PLANO N° / DWG No.		<b>FSS-18-373-FR-03403-AA</b>	


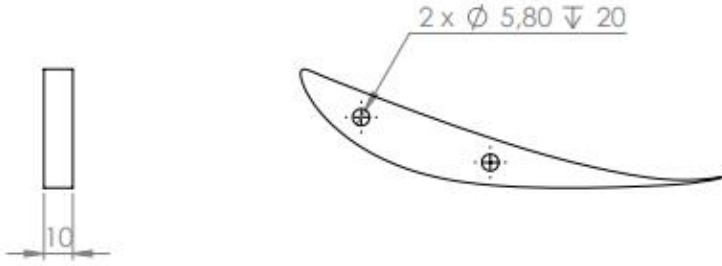
		PROPERTY OF FORMULA UCI THIS DRAWING MUST NOT BE REPRODUCED OR DISCLOSED TO THIRD PARTIES WITHOUT PRIOR CONSENT		<b>A4</b>	
					
GOE570 PROFILE 130 CORD 0.75 THICKNESS					
NOMBRE DEL AUTOR / AUTHOR'S NAME <b>Alejandro Agustín Hurtado</b>		N° TELÉFONO / PHONE NUMBER		MATERIAL / MATERIAL: <b>Carbon fiber-Core foam</b>	
TODAS LAS MEDIDAS APLICADAS A LA PIEZA CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ALL DIMENSIONS APPLY TO FINISHED PART AFTER SURFACE TREATMENT		PROYECCION ACORDE A ISO R 128 PROJECTION ACCORDING ISO R 128		TITULO / TITLE: <b>Lateral Slat Flap</b>	
DIBUJADO / DRAWN <b>Alejandro AH</b> <b>Carlos SM</b>		FECHA / DATE <b>16/05/2018</b> <b>16/06/2018</b>		ESCALA / SCALE <b>1:5</b> <b>0.04 kg</b>	
ACABADO / FINISH		PLANO N° / DWG No.		<b>FSS-18-373-FR-03404-AA</b>	



 FORMULA UCM	PROPERTY OF FORMULA UCM THIS DRAWING MUST NOT BE REPRODUCED OR DISCLOSED TO THIRD PARTIES WITHOUT PRIOR CONSENT	A4
		
FX74140 PROFILE 150 CORD 0.75 THICKNESS		
NOMBRE DEL AUTOR / AUTHOR'S NAME <b>Alejandro Agustín Hurtado</b>		Nº TELEFONO / PHONE NUMBER MATERIAL / MATERIAL: <b>Carbon fiber-Core foam</b>
TODAS LAS MEDIDAS - APLICADAS A LA PIEZA CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ALL DIMENSIONS APPLY TO FINISHED PART AFTER SURFACES TREATMENT PROYECCIÓN ACORDE A ISO R 128 PROJECTION ACCORDING ISO R 128		TÍTULO / TITLE: <div style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: large;">         Lateral          Secondary and Tertiary Flap       </div>
DIBUJADO / DRAWN <b>Alejandro AH</b> <b>Carlos SM</b>	FECHA / DATE <b>16/05/2018</b> <b>16/06/2018</b>	ESCALA / SCALE <b>1:5</b> <b>0.016 kg</b>
ACABADO / FINISH		PLANO N° / DWG No. <b>FSS-18-373-FR-03405-AA</b>

	PROPERTY OF FORMULA UCM THIS DRAWING MUST NOT BE REPRODUCED OR DISCLOSED TO THIRD PARTIES WITHOUT PRIOR CONSENT	<b>A4</b>					
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">GOE570 PROFILE 130 CORD</p>							
NOMBRE DEL AUTOR / AUTHORS NAME: <b>Alejandro Agustín Hurtado</b>		Nº TELÉFONO / PHONE NUMBER:      MATERIAL / MATERIAL: <b>Aluminum</b>					
TODAS LAS MEDIDAS APLICADAS A LA PIEZA CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ALL DIMENSIONS APPLY TO FINISHED PART AFTER SURF. TREATMENT	PROYECCION ACORDE A ISO R 128 PROJECTION ACCORDING ISO R 128						
	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td data-bbox="450 1731 619 1776">DIBUJADO / DRAWN: <b>Alejandro AH</b></td> <td data-bbox="619 1731 746 1776">FECHA / DATE: <b>16/05/2018</b></td> <td data-bbox="746 1731 853 1776">ESCALA / SCALE: <b>1:2</b></td> </tr> <tr> <td data-bbox="450 1776 619 1816">Carlos SM</td> <td data-bbox="619 1776 746 1816"><b>16/06/2018</b></td> <td data-bbox="746 1776 853 1816"><b>0.03737 kg</b></td> </tr> </table>		DIBUJADO / DRAWN: <b>Alejandro AH</b>	FECHA / DATE: <b>16/05/2018</b>	ESCALA / SCALE: <b>1:2</b>	Carlos SM	<b>16/06/2018</b>
DIBUJADO / DRAWN: <b>Alejandro AH</b>	FECHA / DATE: <b>16/05/2018</b>	ESCALA / SCALE: <b>1:2</b>					
Carlos SM	<b>16/06/2018</b>	<b>0.03737 kg</b>					
ACABADO / FINISH		PLANO N° / DWG No. <b>FSS-18-373-FR-03406-AA</b>					

	PROPERTY OF FORMULA UCM THIS DRAWING MUST NOT BE REPRODUCED OR DISCLOSED TO THIRD PARTIES WITHOUT PRIOR CONSENT	A4
		
PROFILE FX74140 570 CORD		
NOMBRE DEL AUTOR / AUTHOR'S NAME <b>Alejandro Agustin Hurtado</b>		Nº TELÉFONO / PHONE NUMBER 
MATERIAL / MATERIAL <b>Aluminum</b>		
TODAS LAS MEDIDAS APUCADAS A LA PIEZA CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ALL DIMENSIONS APPLY TO FINISHED PART AFTER SURFACE TREATMENT	PROYECCION ACORDE A ISO R 128 PROJECTION ACCORDING ISO R 128 	TÍTULO / TITLE: <b>Main Rib</b>
DIBUJADO / DRAWN <b>Alejandro AH</b> <b>Carlos SM</b>	FECHA / DATE <b>16/05/2018</b> <b>16/06/2018</b>	ESCALA / SCALE <b>1:5</b> <b>0.1804 kg</b>
ACABADO / FINISH		PLANO N° / DWG No. <b>FSS-18-373-FR-03407-AA</b>

	PROPERTY OF FORMULA UCM THIS DRAWING MUST NOT BE REPRODUCED OR DISCLOSED TO THIRD PARTIES WITHOUT PRIOR CONSENT	<b>A4</b>
<div style="text-align: center;">  <p>PROFILE FX74140 150 CORD</p> </div>		
TODAS LAS MEDIDAS APLICADAS A LA PIEZA CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ALL DIMENSIONS APPLY TO FINISHED PART AFTER SURF. TREATMENT	NOMBRE DEL AUTOR / AUTHOR'S NAME <b>Alejandro Agustin Hurtado</b>	N° TELÉFONO / PHONE NUMBER: _____ MATERIAL / MATERIAL: <b>Aluminum</b>
	PROYECCION ACORDE A ISO R 128 PROJECTION ACCORDING ISO R 128	TÍTULO / TITLE: <b>Secondary and Tertiary Rib</b>
	DIBUJADO / DRAWN: <b>Alejandro AH</b> <b>Carlos SM</b>	FECHA / DATE: <b>16/05/2018</b> <b>16/06/2018</b> ESCALA / SCALE: <b>1:2</b> <b>0.0681 kg</b> PLANO N° <b>FSS-18-373-FR-03408-AA</b>



